

Grundwasserumsatzräume im Karst der Südlichen
Frankenalb

THOMAS PFAFF

Grundwasserumsatzräume im Karst der Südlichen
Frankenalb

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

THOMAS PFAFF
aus München

München, den 12. Juni 1986

1. Berichterstatter: Prof. Dr. K.-P. Seiler

2. Berichterstatter: Prof. Dr. W.-D. Grimm

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Dezember 1986

Vorwort

Die Anregung zu dieser Arbeit erhielt ich durch Herrn Prof. Dr. K.-P. SEILER. Für sein stetes Interesse, sein Engagement und für die lehrreichen Diskussionen sei ihm recht herzlich gedankt.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. W.-D. GRIMM (LMU-München) für die Übernahme des zweiten Referates für diese Arbeit und Herrn Prof. Dr. H. MOSER, Leiter des Institutes für Radiohydrometrie, für alle mir zuteil gewordene Unterstützung.

Allen Mitarbeitern des GSF-Institutes für Radiohydrometrie danke ich ebenfalls. Besonderer Dank gilt den Herren Dr. BAKER, BEHRENS, DROST, JURRAT, MAUL, MÜLLER, RAUERT, SCHÖNFELD, STICHLER und STÖCKL.

Des weiteren sei auch den zahlreichen anderen beteiligten Institutionen gedankt, insbesondere den Herren Dipl. Ing. DELLEKÖNIG, Baurat KRAUS, Baudirektor MEIER (alle Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt), Oberbaurat HOFSTETTER (Wasserwirtschaftsamt Landshut), Dr. APEL (Geologisches Landesamt) und Dr. HÖRAUF (Landesamt für Wasserwirtschaft).

Zuletzt möchte ich mich auch noch bei den vielen Hilfsbereiten in der Südlichen Frankenalb bedanken, ohne deren tatkräftige Hilfe diese Arbeit so nicht möglich gewesen wäre.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
1.	Einleitung 4
1.1	Problemstellung 4
1.2	Lage des Untersuchungsgebietes 5
1.3	Geologischer Überblick 6
1.4	Stand der hydrogeologischen Forschung 10
1.5	Aufgabenstellung 12
2.	Ergebnisse von Markierungsversuchen 15
3.	Wasserbilanz 25
3.1	Grundwasserneubildung 25
3.2	Wasserbilanz einzelner Quellen und ihre Einzugsgebiete 26
3.3	Zufluß von Grundwasser in die Talfüllung von Vorflutern 31
3.3.1	Zufluß von Grundwasser in die Talfüllung der Altmühl 31
3.3.2	Zufluß von Grundwasser in die Talfüllung der Donau 34
3.4	Zusammenfassung zur Wasserbilanz 35
4.	Isotopische und chemische Eigenschaften des Grundwassers 36
4.1	Isotopenuntersuchungen 36
4.1.1	Tritium 37
4.1.2	Räumliche Verteilung der Tritiumgehalte 39
4.1.3	Sauerstoff-18 42

	<u>Seite</u>
4.2	Ergebnisse zur Chemie der Grundwässer 44
4.2.1	Elektrolytische Leitfähigkeit 44
4.2.2	Kalzium und Magnesium 45
4.3	Grundwassertemperaturen 48
4.4	Zusammenfassung zu den isotopischen und chemischen Eigenschaften des Grundwassers 49
5.	Trockenwetterabflußanalyse 51
5.1	Einleitung 51
5.2	Modellvorstellung 53
5.3	Ergebnisse 61
5.3.1	Anteil von Speicher- und Drainageraum am Gesamthohlraumvolumen 62
5.3.2	Der zeitlich veränderliche Beitrag aus Speicher- und Drainageraum zur Gesamtschüttung 64
5.3.3	Verweilzeiten des Grundwassers 68
5.3.4	Porosität des Karstes 70
5.4	Zusammenfassung zur Trockenwetterabflußanalyse 74
6.	Vergleich von Trockenwetterabflußanalyse und Tritiumexponentialmodell 75
7.	Zusammenfassung 83
8.	Methodik 89
8.1	Abflußmessungen 89
8.2	Pegel 89
8.2.1	Pegelaufzeichnungen 89
8.2.2	Pegelauswertungen 90

	<u>Seite</u>
8.3	Hammerschlagrefraktionsseismik
8.4	Exponentialmodell für Tritiumeintrag
8.5	Trockenwetterabflußanalyse
8.5.1	Grundvorstellung
8.5.2	Abschnittsweise definierte Trockenwetter- ganglinie (TWL)
8.5.3	TWL des maximalen Füllstandes (TWL _{max})
8.5.4	TWL des minimalen Füllstandes (TWL _{min})
8.5.5	best-fit-Kurve
8.5.6	Volumensberechnungen
8.5.7	Schüttungsanteil aus Speicher- und Drainage- raum zur tatsächlichen Schüttung
	91
	93
	96
	96
	97
	97
	98
	99
	100
	101

ANHANG

Verzeichnis der Tabellen	102
Tabellen 6-14	103
Verzeichnis der Abbildungen	117
Abbildungen 25-28	120

LITERATURVERZEICHNIS	126
----------------------	-----

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Karstgesteine weisen wie viele klüftige Gesteine ein Nebeneinander von poröser Gesteinsmatrix und Klüften mit unterschiedlichen Öffnungsweiten und Kluftabständen auf. Im Gegensatz zu wenig löslichen Gesteinen stellt sich durch die Verkarstung, d.h. durch die Erweiterung der Klüfte aufgrund von Lösungsprozessen, eine besonders große Streubreite der Kluftweiten ein. Das hat zur Folge, daß die im Karst ermittelten Grundwasserfließgeschwindigkeiten eine erhebliche Streubreite aufweisen. Die Streuung der Kluftweiten ist im Karst sicher noch weniger kontinuierlich als in unverkarsteten Felsgesteinen (SEILER 1980).

Die Angabe einer mittleren Verweilzeit des Grundwassers, wie sie beispielsweise durch die Interpretation von Isotopenuntersuchungen gewonnen wird, setzt eine gewisse hydraulische Homogenität der Fließwege im Grundwasserkörper voraus. Davon kann in Karstgebieten aber nicht ohne weiteres ausgegangen werden.

In Karstgrundwasserkörper wie jenen auf der Südlichen Frankenalb wird Abwasser eingeleitet und andernorts, jedoch aus dem gleichen Gestein, Grundwasser in Trinkwasserqualität gewonnen. Um die Frage des verträglichen Nebeneinanders dieser beiden wasserwirtschaftlichen Maßnahmen näher zu beleuchten, ist es nicht nur wesentlich, das Grundwasserströmungsfeld im Karst zu erfassen (APEL 1971, VILLINGER 1977). Man muß auch quantifizieren, welchen Einfluß die Faziesausbildung auf die Effizienz des Grundwassertransportes hat, wie viele unterschiedliche, leistungsfähige Grundwasserumsatzräume der Karstgrundwasserkörper besitzt und welchen Anteil die einzelnen Umsatzräume am Grundwasserkörper haben. Die Beantwortung

dieser Fragen ist abhängig vom Betrachtungsmaßstab, zumal man davon ausgehen darf, daß z.B. verkarstete Hohlräume keine unendliche Erstreckung haben und sie ihre Effizienz für den Transport des Grundwassers dort, wo sie durch eine wenig durchlässige Überdeckung plombiert sind, nicht entfalten können.

1.2 Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 1) erfaßt einen großen Teil der Südlichen Frankenalb. Es erstreckt sich in Ost-West-Richtung von Kelheim bis Pappenheim und in Nord-Süd-Richtung von Titting bis Ingolstadt (Abb. 25). Es wird von den Flüssen Donau, Altmühl und Anlauter durchzogen und ist in seinem nördlichen und südlichen Teil reich an Karstquellen und sehr arm an kleineren wasserführenden Oberflächengerinnen. Zugleich durchziehen zahlreiche Trockentäler die Hochflächen zwischen Donau, Altmühl und Anlauter. Diese und Dolinen in großer Zahl geben dem Gebiet den typischen morphologischen Charakter einer Karstlandschaft. Die Hochflächen sind zu über 50 % bewaldet, der Rest ist landwirtschaftliche Nutzfläche.

Im weiteren wird das Gebiet zwischen Anlauter und Altmühl als Anlauterabschnitt und das Gebiet zwischen Altmühl und Donau als Donauabschnitt bezeichnet.

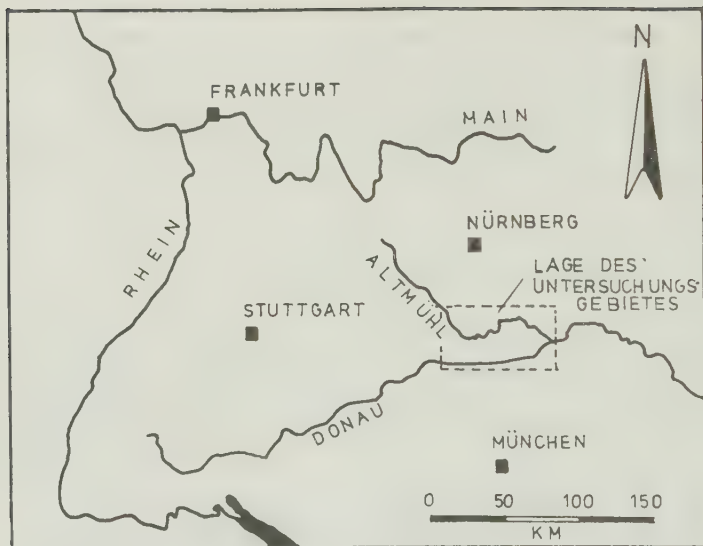


Abb. 1: Großräumige Lage des Untersuchungsgebietes.

1.3 Geologischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet liegt im südlichsten und damit stratigraphisch jüngsten Teil des Fränkischen Schichtstufenlandes. Es besteht hauptsächlich aus karbonatischen Sedimentgesteinen des Malm.

Ab dem Lias bis in den oberen Malm ist dieses Gebiet mehr oder weniger durchgehend Sedimentationsgebiet. Im Lias geht die Entwicklung zu einer Beckenvertiefung, und zwar über Kalksandsteine (Arietenschichten) und Kalke (Numismatiskalke) zu dunklen Mergeltonen (Amaltheentone) und Ölschiefen (Posidonienschiefer).

Im Dogger zeigen sich wieder Hebungstendenzen vom grauen "Opalinuston" des Dogger Alpha über die Eisensandsteine des Dogger Beta zu den Kalkmergelabfolgen des oberen Dogger. Der Ornatenton des Dogger Zeta ist bis 9 m mächtig und durchgehend fast im ganzen Gebiet vorhanden (APEL 1971). Deshalb kann er hydrogeologisch als Stauhorizont, d.h. Sohlschicht (s.u.) des darüberliegenden Malmgrundwasserkörpers, betrachtet werden.

Der Malm, der bis 500 m mächtig werden kann, zeigt zwei große Einheiten:

- Die geschichtete Fazies, die aus zwei Sedimentationszyklen mit jeweils Mergeln an der Basis und darüber Kalken besteht. Der erste Zyklus reicht vom Malm Alpha bis zum Malm Beta, der zweite vom Malm Gamma bis in den mittleren Malm Zeta. Hydrogeologisch wichtig sind die Mergel an der Malmbasis, die gemeinsam mit dem Ornatenton die Sohlschicht des Malmgrundwasserkörpers bilden. Die ca. 30 m mächtigen Platynota- und Crusso-liensismergel des Malm Gamma als Basis des zweiten Zyklus hingegen sind hydraulisch nur als unvollkommener Stauhorizont wirksam: Über ihnen treten zwar die meisten und die stärksten Quellen im Untersuchungsgebiet auf; jedoch zeigen Untersuchungen in anderen Gebieten (z.B. VILLINGER 1977), daß dieser Stauhorizont recht unvollkommen ist.
- Die Rifffazies, die meist aus Schwammriffen besteht, tritt neben der geschichteten Fazies vereinzelt seit dem Malm Alpha, verstärkt seit dem Malm Gamma auf. Das Riffwachstum, das bis zur Plattformbildung gehen kann, hat seinen Höhepunkt im Malm Delta und klingt zu jüngeren Schichtgliedern des Malm hin aus.

Das Nebeneinander von Schicht- und Rifffazies führt aufgrund unterschiedlicher Sedimentations- bzw. Riffwachstumsraten einerseits und einer unterschiedlichen Kompaktion von Schicht- und Riffsedimenten andererseits ab dem Malm Delta zur Ausbildung von Wannen mit geschichteten Kalken zwischen den einzelnen Riffkomplexen (Abb. 5). Insbesondere die unterschiedliche Kompaktion der beiden Faziesausbildungen im Malm führt zu atektonischen Schichtverbiegungen (FREYBERG 1969).

Die Bankmächtigkeiten der geschichteten Fazies reichen von wenigen Millimetern (Papierschiefer, Malm Zeta 3) über einige Zentimeter und Dezimeter (Werkkalke, Malm Beta) bis zu ca. 2 m (Treuchtlinger Marmor, Malm Delta). Die Massenkalken sind meist dolomitisiert und zeigen deswegen eine gewisse, diagenetisch bedingte Eigenporosität.

Im Donauabschnitt des Untersuchungsgebietes ist eine nach Süden an Häufigkeit und Mächtigkeit zunehmende Überdeckung der Malmgesteine durch jüngere tertiäre und quartäre sandig-tonige Sedimente zu beobachten. Teilweise findet man örtliche Relikte der cenomanen Schutzfelsschichten und der Neuburger Kieselkreide. Es überwiegen jedoch Tone, Sande und Süßwasserkalke der Oberen Süßwassermolasse und quartäre sandig-tonige Ablagerungen in z.T. großflächiger Verbreitung.

Die Malmtafel fällt mit $1-3^\circ$ nach SSE ein (Abb. 2). Am Südrand des Untersuchungsgebietes taucht der Malm flexurartig unter die Molasse, so daß man dort wohl vermehrt Dehnungsklüfte mit ENE-WSW-Verlauf erwarten darf (FREYBERG 1969).

Das Untersuchungsgebiet wird von mehreren kleinen Störungen durchzogen. Im nördlichen Teil macht sich insbesondere das E-W streichende Schwäbisch-Fränkische Lineament bemerkbar (Abb.30).

Die Maxima der Klufttrichtungen liegen bei 30° und $100-140^\circ$ (APEL 1971). Die Kluftabstände und -weiten in den Kalken verhalten sich meist proportional zur Bankmächtigkeit (APEL 1971).

Seit dem Ende der Malm-sedimentation ist das Untersuchungsgebiet mit Ausnahme kurzer Unterbrechungen Hochgebiet und damit der Verkarstung ausgesetzt. Die Vorfluter des Untersuchungsgebietes - heute sind das im wesentlichen Anlauter, Altmühl und Donau - haben sich tief in die Karbonatplattform hineingeschnitten, so daß zwischen dem Talniveau und den verbliebenen Hochflächen Höhenunterschiede bis über 100 m entstanden sind.

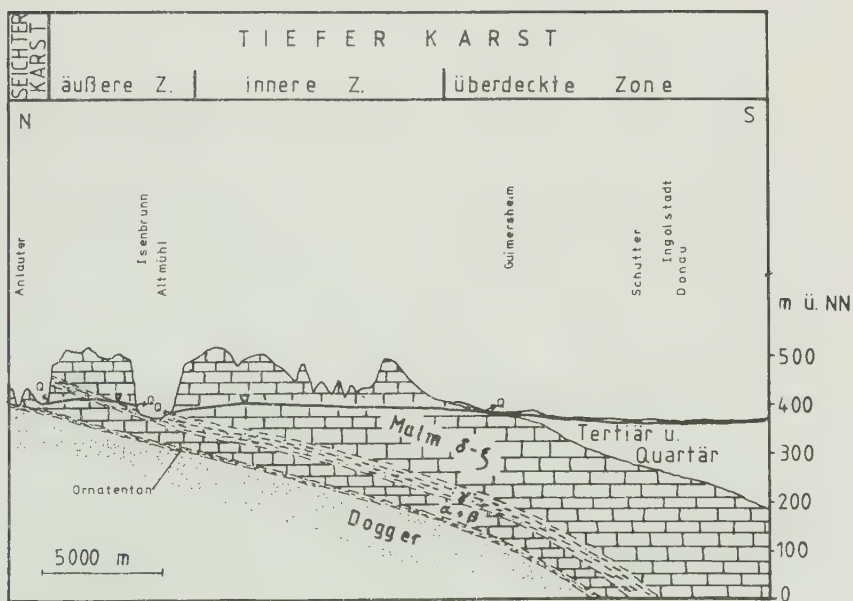


Abb. 2: Geologisches Profil durch das Untersuchungsgebiet nach APEL (1971), Q=Quellaustritte.

1.4 Stand der hydrogeologischen Forschung

Die umfassendste und zugleich grundlegende hydrogeologische Arbeit über die hier untersuchte Region stammt von APEL (1971). Er gliedert den Karst in Seichten Karst und Tiefen Karst auf (Abb. 2) - die von VILLINGER (1977) vorgeschlagene Abgrenzung zwischen Seichtem und Tiefem Karst bringt im Untersuchungsgebiet gegenüber der von APEL (1971) nur wenig Veränderung. Beim Seichten Karst liegt der Grundwasserstauer, hier der Ornatenton und der mergelige Malm Alpha, über dem Vorflutniveau, beim Tiefen Karst darunter. Durch das Abtauchen der Grundwassersohlschicht des Malms nach Süden nimmt die Grundwassermächtigkeit im Malm nach Süden hin zu. Genauere Angaben zur Grundwassermächtigkeit im Malm macht STREIT (1971), der im Süden des Untersuchungsgebietes eine Grundwassermächtigkeit von über 300 m angibt.

APEL (1971) zeigt einen Zusammenhang zwischen den Klufrichtungen und der Richtung der Trockentäler auf. Von der Morphologie kann demnach mit Einschränkungen auf die Verkarstung im Untergrund geschlossen werden. APEL (1971) und ANDRES & CLAUS (1964) fassen den Grundwasserkörper großräumig als mehr oder weniger isotrop auf. Diese Annahme ist die Basis für Grundwasserhöhenpläne. Als Hauptproblem stellt APEL (1971) die Festlegung und die Funktionsweise der Wasserscheide zwischen Donau und Altmühl heraus. Dazu führte er u.a. im Bereich dieser Wasserscheide Markierungsversuche durch, die einen Markierungsstoffnachweis in allen beobachteten Quellen beiderseits der unterirdischen Wasserscheide erbrachten. APEL (1971) schließt hieraus auf ein allseitiges Abfließen der Markierungsstoffe im oberflächennahen Bereich ab der Wasserscheide. APEL (1971) untersuchte Quellwässer auf ihren Tritiumgehalt und berichtet, daß sowohl solche mit sehr hohen Tritiumgehalten als auch fast tritiumfreie Quellwässer auftreten. Er interpretiert die Wässer mit hohen Tritiumgehalten als "Oberflächenwässer" und die mit sehr kleinen Tritiumge-

halten als "Tiefenkarstwasser". APEL (1971) geht damit in erster Linie von einem Übereinander verschiedener Karstgrundwasserbereiche aus. VILLINGER (1969, 1972) stellt im Gegensatz dazu aufgrund von Markierungen im Bereich der Schwäbischen Alb großmaßstäblich auch ein Nebeneinander verschiedener Karstgrundwasserbereiche fest. Jede Quelle hat diesen Untersuchungen zufolge ihr eigenes, eng begrenztes Einzugsgebiet, wenn man von jahreszeitlichen Schwankungen der unterirdischen Bergwasserscheiden zwischen den einzelnen Einzugsgebieten absieht. Deshalb stellt sich die Frage,

- ob das von APEL (1971) geschilderte Übereinander verschiedener Karstgrundwasserbereiche nicht auch ein Nebeneinander dieser Bereiche zuläßt und
- ob nicht die lateralen Durchlässigkeitsunterschiede im Grundwasserkörper eine ebenso große Rolle wie die vertikalen spielen können.

Im Gegensatz zu den Markierungsergebnissen von APEL (1971) und in Analogie zu VILLINGER (1972, 1977) können BEHRENS & SEILER (1981) durch ihre Markierungen für jeden Eingabepunkt den Markierungsstoffnachweis in der Regel nur in einer, selten auch einmal in zwei Quellen führen.

Vermutlich führt die von APEL (1971) durchgeführte Art der Probennahme mit Aktivkohle wegen der immer wieder nachweisbaren, geringen Grundbelastung des Karstgrundwassers mit Fluoreszenzfarbstoffen zu unrichtigen Versuchsergebnissen. BEHRENS & SEILER (1981) können auch eine großräumige Unterdückerung der Altmühl, wie sie nach BOIE (1961) im Raum Denking-Böhming bestehen soll, aus einer Vielzahl an Markierungen nicht verifizieren.

1.5 Aufgabenstellung

Neben den aufgeführten Unterschieden in der Beurteilung der Grundwasserbewegung im Karst blieben bislang Fragen nach einer Präzisierung der Karstgrundwasserbewegung unbeantwortet. Solche Fragen betreffen

- den Einfluß der Gesteinsfazies auf die Karstwasserbewegung,
- eine Quantifizierung des Volumensanteils an verkarsteten Grundwasserfließwegen gegenüber solchen ohne nennenswerte Verkarstung,
- eine Quantifizierung der Grundwasserumsatzmengen in den verschiedenen Hohlraumsystemen,
- eine Bewertung der Geometrie des Grundwasserströmungsfeldes im Hinblick auf das Auslaufverhalten der Quellen und
- eine Darstellung, nach welchen idealisierten hydrologischen Modellvorstellungen die isotopische Information des Karstgrundwassers ausgewertet werden sollte.

Als hydrogeologische Beobachtungspunkte stehen im Untersuchungsgebiet zum einen die natürlichen Quellaustritte zur Verfügung. Zum anderen gibt es eine Reihe von meist in den Flußniederungen gelegenen Trinkwassergewinnungsanlagen.

Jede hydrogeologische Untersuchung geht von einer vergleichenden Betrachtung von Eintrags- und Austragsfunktion in das bzw. aus dem hydrogeologischen System aus. Die Transformation der Eintrags- in die Austragsfunktion wird durch die grundwasserhydraulischen Verhältnisse und bei den chemischen Parametern zusätzlich durch die chemischen Umsatzbedingungen be-

stimmt. Der Eintrag kann flächig oder punktförmig erfolgen, und die Austragsfunktion erbringt daher eine Summen- bzw. Detailinformation über das Grundwassersystem. Flächige Einträge geschehen überwiegend auf natürlichem Wege, punktförmige Einträge hingegen werden meist künstlich erzeugt.

Zur Beantwortung der oben angeschnittenen Fragen werden in der vorliegenden Arbeit folgende Austragsfunktionsparameter des Karstgrundwassers betrachtet:

- Konzentrations-Zeit-Kurven aus Karstwassermarkierungen,
- Schüttungsänderungen/Zeit (dQ/dt) in Vorflutern, vor allem aber in Quellen,
- Isotopenzusammensetzung (3H , ^{18}O),
- Chemismus (Kalzium, Magnesium, Leitfähigkeit),
- Temperatur.

Mit diesen Parametern werden folgende Aussagen angestrebt:

- Markierungsversuche im gesamten Untersuchungsgebiet, die in großer Zahl vorliegen, werden für die Ermittlung von unterirdischen Einzugsgebieten durchgeführt und/oder herangezogen.
- Diese unterirdischen Einzugsgebiete werden mit der Lage der vorhandenen geologischen Ränder, im allgemeinen der räumlichen Verteilung von Schicht- und Riffazies, verglichen.
- Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Markierungsversuche wird eine Wasserbilanz für einzelne Quellen sowie für größere Gebietsteile aufgestellt, um die Bedeutung der geologischen Ränder zu überprüfen. Weiter wird gefragt, ob die einzelnen Einzugsgebiete vollständig über die beobachtbaren Quellen entwässern oder ob auch ein unterirdischer Abfluß in die Talfüllung der Vorfluter erfolgt.

- Die Quellwässer werden auf ihren Gehalt an Tritium, Kalzium und Magnesium, ihre elektrolytische Leitfähigkeit und Temperatur hin untersucht. Diese Ergebnisse werden mit der räumlichen Verteilung der Quellwässer, insbesondere ihrer Faziesabhängigkeit korreliert. Gefragt wird auch, inwieweit die Austragsfunktionen in den verschiedenen Quellen miteinander korrelierbar sind.
- Über die Analyse des Trockenwetterabflusses, d.h. den Schüttungsrückgang über die Zeit, werden einzugsgebietspezifische Summenparameter erarbeitet und speziell der Einfluß unterschiedlicher Grundwasserumsatzräume auf das Schüttungsverhalten von Quellen untersucht.
- Zur Überprüfung der Aussagen der Trockenwetterabflußanalyse werden mit den aus der Trockenwetterabflußanalyse erhaltenen hydraulischen Summenparametern Modellrechnungen durchgeführt. Mit diesen Summenparametern werden die Gehalte an Tritium im Grundwasser berechnet und mit den im Untersuchungsgebiet gemessenen Tritiumgehalten verglichen.

2. Ergebnisse von Markierungsversuchen

Durch Markierungsversuche wird dem Grundwasser ein Markierungsstoff künstlich und punktförmig von der Karstoberfläche her zugeführt. An den Markierungsstoff werden folgende Anforderungen gestellt:

- Keine Wechselwirkung mit dem Gestein,
- keine chemische und mikrobiologische Umsetzung im Untergrund,
- vollkommene Löslichkeit im Karstgrundwasser,
- keine Dichteänderung im Karstgrundwasser.

Markierungsstoffe, die diesen Anforderungen genügen, geben die Grundwasserbewegung naturgetreu wieder und werden als konservativ in Bezug auf die Grundwasserbewegung bezeichnet (MOSER & RAUERT 1980). Als Markierungsstoffe wurden meist Uranin mit einer Nachweisgrenze von 0.002 mg/m^3 und Eosin mit einer Nachweisgrenze von 0.02 mg/m^3 bei spektralfluorimetrischem Nachweis (BEHRENS 1971) verwendet. Die eingebrachten Mengen betrugen in der Regel 5 kg für Uranin und 10 kg für Eosin.

Die Markierungsversuche liefern am Nachweisort Durchgangskurven (BUSCH & LUCKNER 1974): Aus der Zeitdifferenz von Eingabezeit (t_0) zum ersten Auftreten des Markierungsstoffes am Beobachtungsort (t_1) ergibt sich die maximale Abstandsgeschwindigkeit (Abb. 3):

$$v_{a1} = \text{Entfernung} / (t_1 - t_0) \quad [\text{m/d}]$$

und aus der Differenz zur Zeit der maximalen Markierungsstoffkonzentration (t_2) der Durchgangskurve die intensive Abstandsgeschwindigkeit (Abb. 3):

$$v_{a2} = \text{Entfernung} / (t_2 - t_0) \quad [\text{m/d}]$$

und aus der Differenz zur Schwerpunktszeit (t_3) der Durchgangskurve die mittlere Abstandsgeschwindigkeit (Abb. 3):

$$v_{a3} = \text{Entfernung} / (t_3 - t_0) \quad [\text{m/d}]$$

Wegen der schwierigen Bestimmung des Schwerpunkts einer Durchgangskurve im Karst (siehe u.) wird im weiteren immer die intensive Abstandsgeschwindigkeit betrachtet, da das Maximum der Durchgangskurven verhältnismäßig genau zu bestimmen ist.

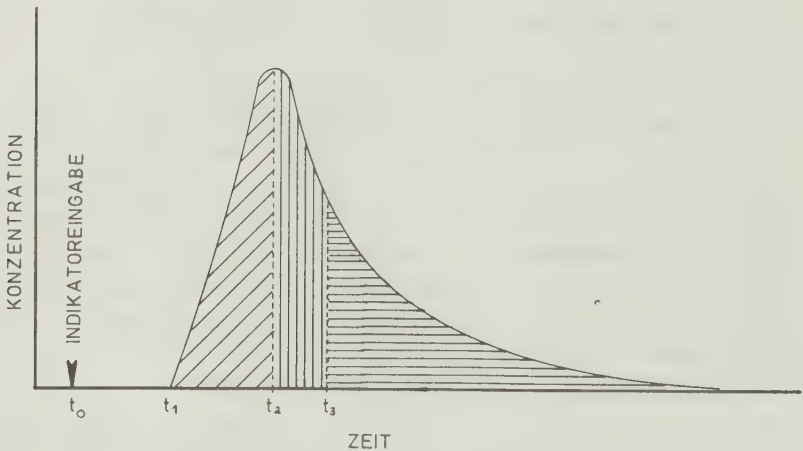


Abb. 3: Durchgangskurve eines Markierungsstoffes und die Zeiten zur Bestimmung unterschiedlich definierter Abstandsgeschwindigkeiten.

Die gesamte wieder ausgetretene Markierungsstoffmenge (M) entspricht:

$$M = \int_{t_0}^{\infty} Q(t) * c(t) \, dt \quad [\text{g}]$$

Der relative Anteil der wieder ausgetretenen zur eingegebenen Markierungsstoffmenge wird als Rückgewinnung bezeichnet.

In der Südlichen Frankenalb wurden vom GSF-Institut für Radiohydrometrie zwischen 1977 und 1985 insgesamt 62 Karstwassermarkierungen durchgeführt (Abb. 26 und Tab. 13). Die meisten davon wurden in Dolinen, d.h. in das auch an der Oberfläche sichtbare, verkarstete Kluftsystem eingebracht.

Die aus den Markierungsversuchen errechneten Abstandsgeschwindigkeiten variieren in weiten Grenzen (Tab. 13). Sie liegen zwischen 39 m/d und 5000 m/d. BEHRENS & SEILER (1981) stellten fest, daß die rückgewonnene Markierungsstoffmenge entweder größer als 50 % oder kleiner als 10 % der eingebrachten Menge ist, daß hohe Abstandsgeschwindigkeiten meist auch eine hohe Rückgewinnungsrate und daß kleine Abstandsgeschwindigkeiten (kleiner 500 m/d) stets kleine Rückgewinnungsraten zur Folge haben. D.h., bei kleinen Rückgewinnungsraten werden durch die Markierung keine, bzw. in unbedeutendem Maße, leistungsstarke und durchgehende hydraulische Verbindungen zwischen Eingabeort und Quelle angesprochen, weil sich der Markierungsstoff weiträumig im Karstgrundwasser ausbreitet. Umgekehrt spricht eine hohe Markierungsstoffrückgewinnung dafür, daß der Markierungsstoff keine weiträumige Ausbreitung erfahren hat und zudem rasch wieder in einer Quelle erscheint. Hier kommt die bekannte Tatsache zum Ausdruck, daß die schnellen Fließwege im Karst, die Karsthohlräume, eine sammelnde Wirkung auf das Grundwasser ausüben und daß die Fließwege mit kleiner Fließgeschwindigkeit eine dissipierende Wirkung haben. Darüber hinaus deuten diese Ergebnisse an, daß die verschiedenen Umsatzräume des Karstgrundwassers nicht nur übereinander (APEL 1971), sondern auch nebeneinander vorkommen.

Die Markierungsstoffausbreitung in der wasserungesättigten Zone, die im Untersuchungsgebiet bis 150 m mächtig werden kann, wird bei dieser Wertung der Markierungsergebnisse ausgeklammert. Dies ist zum Teil sicher dort zulässig, wo die Markierungen direkt in Dolinen eingebracht und mehrere m³ Wasser vor- und auch nachgespült wurden, so daß von einem fast gesättigten Fließen im Entwässerungssystem der Doline ausgegangen werden kann und der Markierungsstoff auf diese Weise rasch in das Grundwasser eingetragen wurde. Andererseits zeigte sich auch bei solchen Markierungen in Quellen wie z.B. in Altdorf (Anlautertal) oder in Obereichstätt-Steinbruch (Altmühltal), daß nach durchgeführter Markierung zunächst der übliche Markierungsstoffdurchgang mit erst schnell ansteigender und dann langsam abfallender Konzentration erfolgte; jedoch waren auch lange nach dem ersten Markierungsstoffdurchgang im Gefolge stärkerer Niederschläge weitere neue Durchgänge zu beobachten. Man muß daraus schließen, daß der Markierungsstoff nicht auf einmal in das Grundwasser eingetragen, sondern teilweise in der ungesättigten Zone zurückgehalten wurde. Ein besonders lehrreiches Beispiel hierzu liefert die Markierung in Langenaltheim durch BOIE (1961), die 25 Jahre nach ihrer Durchführung bei bestimmten kräftigen Niederschlagsereignissen auch heute noch Markierungsstoffdurchgänge in der Quelle Solnhofen (Altmühltal) erzeugt. Es ist daher manchmal problematisch, Rückschlüsse auf das Ausbreitungsverhalten des Markierungsstoffes im Karstgrundwasser allein aufgrund der rückgewonnenen Markierungsstoffmenge zu ziehen, weil auf einen ersten Markierungsstoffdurchgang weitere folgen können.

Im Anlauterabschnitt führten alle Markierungen mit Ausnahme derer bei Buchenhüll und Schönfeld zu einem Markierungsstoffnachweis in Quellen (Abb. 26) (BEHRENS & SEILER 1981). Im Donauabschnitt des Untersuchungsgebietes liegen nördlich der Linie Kipfenberg-Altmühlmünster (Abb. 25) hydrologisch und geologisch ähnliche Verhältnisse wie im Anlautergebiet vor.

Auch hier erbrachten sämtliche Markierungen einen Markierungsstoffnachweis (Abb. 26). Südlich dieser Linie konnte jedoch bei keiner der dort angesetzten Markierungen ein Markierungsstoffnachweis in Quellen oder Brunnen geführt werden. Dies kann auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- Der Markierungsstoff wurde meist im Umfeld der unterirdischen Bergwasserscheide zwischen Altmühl und Donau (APEL 1971) eingebracht. Die Geometrie des Grundwasserströmungsfeldes bewirkt hier ein tiefes Eindringen in den Karstgrundwasserkörper, d.h., der Markierungsstoff wird auf sehr langen Fließwegen zur Donau transportiert.
- Der intensive Verkarstungsprozeß des Karbonatgesteines ist hauptsächlich ein Phänomen im weiteren Bereich der Grundwasseroberfläche (BÖGLI 1978). D.h., die Markierungsstoffe gelangen durch die Zone der intensiven Verkarstung in eine tiefere Zone mit geringerer Verkarstung und damit in dissipierende Systeme.
- Im Donauabschnitt des Untersuchungsgebietes entfaltet die Zone intensiver Verkarstung in der Regel keine große sammelnde Wirkung auf die Karstgrundwasserbewegung, weil durch die Überdeckung des Karstes durch feinkörnige, tertiäre Sedimente die drainierende Wirkung der verkarsteten Fließwege stark behindert ist.

Darüber hinaus ist noch zu klären, ob gegebenenfalls auch die Faziesausbildung des Gesteins einen Einfluß auf die weiträumige Markierungsstoffausbreitung ausübt.

Es zeigt sich, daß im nördlichen Donauabschnitt alle Markierungen nördlich der Linie Kipfenberg-Altmühlmünster in der geschichteten Fazies und die südlich davon alle in der Riffazies eingebracht wurden (Abb. 4, 25, 26). Die geschichtete Fazies ist von einer Vielzahl von Klüften durchzogen. Je größer die Bankmächtigkeiten sind, um so größer sind nach aller Erfahrung auch die Kluftweiten, die Kluftabstände und die Durchgängigkeit der Klüfte. Dagegen muß die Riffazies, die meist dolomitisiert ist, hydrogeologisch als klüftig-poröser Gesteinskörper angesehen werden. Bei der diagenetischen Umwandlung von Kalzit in Dolomit tritt nämlich eine Volumensreduktion ein, die bis zu 3 Vol.% (DAVIS & DE WIEST 1967) beträgt. Sie schafft eine Vielzahl kleiner Gesteinshohlräume, die jedoch in der Regel nicht miteinander in Verbindung stehen und Totporen (dead end pores) darstellen. Daher sind die durch atektonische Schichtverbiegung entstandenen Wannen (Abb. 5) sicher eher als die Riffkomplexe in der Lage, wassersammelnd zu wirken und damit den Markierungsstoff in einige wenige, diskrete Fließwege im Untergrund abzuleiten.

Ein eingebrachter Markierungsstoff wird sowohl auf dem Wege der hydrodynamischen Dispersion als auch auf dem Wege der molekularen Diffusion verdünnt. Die Dispersion eines Markierungsstoffes im Untergrund kann bei punktförmiger, momentaner Zugabe (DIRAC-Funktion) einer Menge (M) des Markierungsstoffes in Abhängigkeit der Durchflußfläche (F) im Grundwasserkörper, der effektiven Porosität (n_e) des Gesteins, des Dispersionskoeffizienten (D) und der mittleren Aufenthaltszeit (t_0) des Grundwassers zwischen Eingabe- und Beobachtungsort als Funktion der Austragskonzentration $c(x,t)$ für eine beliebige Entfernung (x) vom Eintragsort und eine beliebige Zeit (t) beschrieben werden (z.B. MALOSZEWSKI & ZUBER 1983):

$$c(x,t) = \frac{M}{F * n \sqrt{4 * \pi * D * t_0}} * e^{-\frac{(x - v * t)^2}{4 * D * t_0}} \quad [\text{Konz}]$$

Hierbei wird nur der longitudinale Anteil der Dispersion betrachtet. Der exponentielle Term wird gleich 1, wenn wie im vorliegenden Fall nur die maximale Konzentration, d.h. die Frage, ob die Nachweisgrenze bereits unterschritten wird, interessiert.

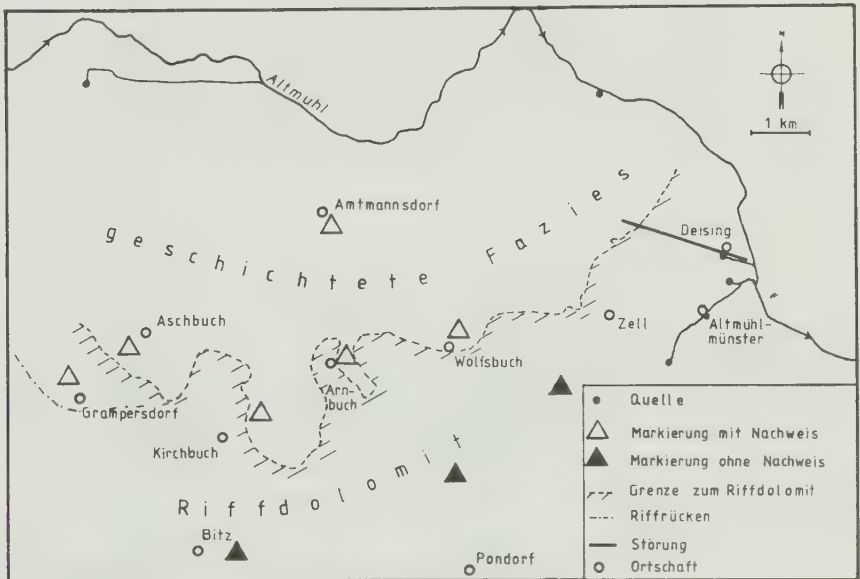


Abb. 4: Eingabeorte und Markierungsergebnisse in Bezug zu Riff- bzw. Schichtfazies im nördlichen Donauabschnitt des Untersuchungsgebietes (vgl. auch Abb. 26).

Geht man aufgrund der größeren Grundwassermächtigkeit im Süden von einer 10-fach größeren Durchflußfläche im Vergleich zum Norden des Untersuchungsgebietes und einer gleichen effektiven Porosität aus, so muß das Produkt aus Dispersionskoeffizient und mittlerer Aufenthaltszeit in der Riffazies immer noch um mehrere Größenordnungen größer als in der geschichteten Fazies sein, damit die Markierungsstoffkonzentration unter der Nachweisgrenze zu liegen kommt.

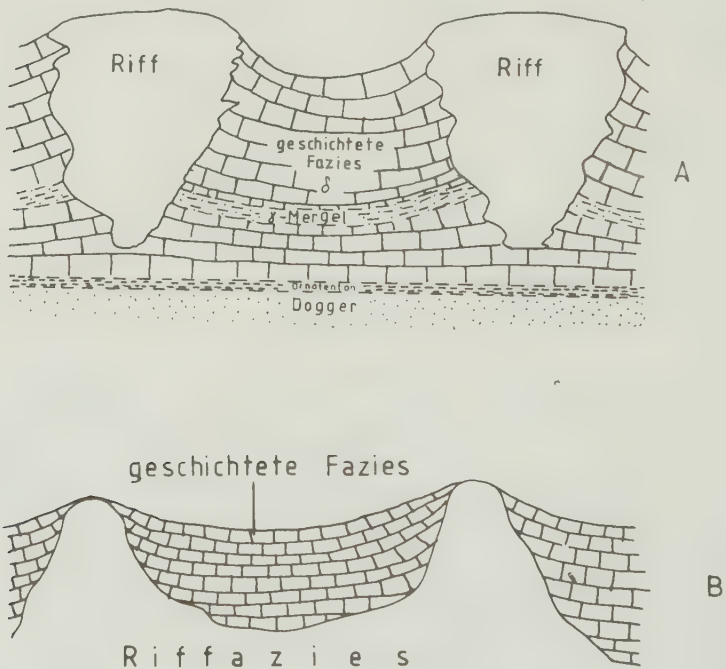


Abb. 5: Profilskizze:

- A: Nebeneinander von Schicht- und Riffazies.
- B: Übereinander von Schicht- und Riffazies.

Je kleiner jedoch die Fließgeschwindigkeit, d.h., je größer die Verweilzeit des Grundwassers im Gestein ist, desto größer ist die Bedeutung, die der molekularen Diffusion am Verdünnungsgeschehen zukommt. Bei sehr kleinen Abstandsgeschwindigkeiten können die Totporen der Riffazies durchaus als Austauschvolumen für die molekulare Diffusion Bedeutung erlangen.

Um den oben dargestellten Einfluß der Fazies des Gesteins auf das Markierungsergebnis zu überprüfen, wurden im Donauabschnitt des Untersuchungsgebietes bei Kirchbuch und bei Zell je eine Markierung an geologisch und hydrogeologisch besonderen Orten durchgeführt:

- Der Eingabeort südwestlich von Zell (Abb. 4) liegt nur 2.5 - 3.5 km von den Quellen Altmühlmünster bzw. Deising entfernt in der Riffazies. Nach dem Grundwasserhöhenplan (APEL 1971) wäre ein Nachweis in den 2.5 km entfernten Quellen von Altmühlmünster zu erwarten gewesen. Der Markierungsstoff konnte aber trotz seines konservativen Verhaltens nirgends nachgewiesen werden.
- Der Eingabeort bei Kirchbuch liegt auf gleicher geographischer Breite wie der bei Zell, aber wesentlich weiter im Westen, 8.6 km von der Quelle Deising entfernt in der geschichteten Fazies. Er ist von Riffen fast ganz eingeschlossen, nur im Norden besteht eine schmale Verbindung zu dem großen Komplex der zur Quelle Deising entwässernden geschichteten Fazies. Der Markierungsstoffnachweis wurde in der Quelle Deising erbracht (Abb. 4).

Zumindest diese beiden Versuche bestätigen die Vermutung, daß im Untersuchungsgebiet die Fazies am Markierungsort einen Einfluß auf das Ergebnis der Markierung und damit auf das Ausbreitungsverhalten von Markierungsstoffen hat. Die Riffazies bewirkt ganz offensichtlich eine stärkere Markierungsstoffverdünnung im Untergrund als dies in der geschichteten Fazies der Fall ist. Man könnte einwenden, daß der Grundwasserhöhenplan in dem Gebietsabschnitt um Zell nicht exakt ist. Hierzu muß angemerkt werden, daß bei allen Markierungsversuchen mit positivem Ergebnis die konstruierte und die nachgewiesene Grundwasserbewegungsrichtung gut übereingestimmt haben. Im übrigen fällt es gerade im Fall von Zell schwer, an eine andere als die im Grundwasserhöhenplan vorgegebene, generelle Grundwasserbewegungsrichtung zu denken.

Die in Abbildung 4 ausgewiesenen Markierungsergebnisse zeigen zudem, daß der Einfluß der Fazies auf das Markierungsergebnis nicht mit Sicherheit, sondern nur mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit besteht. Dieser Fazieseinfluß auf das Markierungsergebnis könnte darin bestehen, daß in der Riffazies nur ganz vereinzelt durchgängige Karsthohlräume mit ihrer drainierenden Wirkung bestehen, daß die Grundwasserbewegung in der Riffazies nur sehr langsam erfolgt und daß in der Riffazies deutlich höhere Dispersionskoeffizienten als in der Schichtfazies auftreten. Dazu können im Rahmen dieser Arbeit nur abschätzende, jedoch keine abschließenden Untersuchungsergebnisse erbracht werden (siehe Kap. 4.1.2).

3. Wasserbilanz

Zur weiteren Präzisierung des Einflusses der Gesteinsfazies auf die Karstgrundwasserbewegung werden Ergebnisse der Wasserbilanz mit den Markierungsergebnissen und dem geologischen Aufbau des Untersuchungsgebietes verglichen. Hierzu dienen vor allem Quellbeobachtungen. Ist die Grundwasserneubildung größer als die beobachtbare Ausflußmenge einer Quelle mit ihrem durch Karstgrundwassermarkierungen nachgewiesenen unterirdischen Einzugsgebiet, dann muß ein diffuser Ausfluß stattfinden, der auf die örtlichen Vorfluter weist.

3.1 Grundwasserneubildung

Der Gebietsabfluß (h_A) über einen Zeitraum wird aus der Differenz von Niederschlagshöhe (h_N) und Verdunstungshöhe (h_V) berechnet (RICHTER & LILLICH 1975):

$$h_A = h_N - h_V \quad [\text{mm/a}]$$

Der Gebietsabfluß setzt sich aus der Höhe von Direktabfluß (h_D) und grundwasserbürtigem Abfluß (h_G) zusammen:

$$h_A = (h_D + h_G) \quad [\text{mm/a}]$$

Wegen der Verkarstung des Gesteins ab der Geländeoberfläche ist im Untersuchungsgebiet, abgesehen von extremen Wettersituationen, ein Direktabfluß nicht zu beobachten, d.h., die Grundwasserneubildungshöhe (h_B) entspricht in der Regel dem Gebietsabfluß.

Die meteorologischen Daten wurden dem HYDROLOGISCHEN ATLAS DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (DE HAAR et. al. 1978) entnommen. Um den regional unterschiedlichen meteorologischen Gegebenheiten in dem großen Untersuchungsgebiet Rechnung zu tragen, wurden Anlauter- und Donauabschnitt getrennt betrachtet. Die jährliche Niederschlagshöhe beträgt im Donauabschnitt 700 mm, im Anlauterabschnitt 750 mm. Die effektive, jährliche Verdunstungshöhe wird je nach Berechnungsverfahren mit 450 - 500 mm im Donau- und 450 - 475 mm im Anlauterabschnitt angegeben. Im weiteren wird daher mit einer Grundwasserneubildungsrate von $750 - 450 = 300 \text{ mm/a}$ für den Anlauter- und von $700 - 450 = 250 \text{ mm/a}$ für den Donauabschnitt des Untersuchungsgebietes gerechnet. Dies entspricht $9.5 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$ bzw. $8.0 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$.

Im Sommer wird ein Großteil des Niederschlags von der Bodenzone und den teilweise vorhandenen, geringmächtigen, lehmigen Verwitterungsbildungen darunter zurückgehalten und verdunstet wieder. D.h., die Grundwasserneubildung findet hauptsächlich im Winter und Frühjahr statt. Das Verhältnis von Sommer- zu Wintergrundwasserneubildung beträgt auf der Grundlage der aktuellen Verdunstung nach ALBRECHT (in DE HAAR et. al. 1978) für den Anlauterabschnitt 1:6 und für den Donauabschnitt 1:10.

3.2 Wasserbilanz einzelner Quellen und ihre Einzugsgebiete

Ausgangspunkt für die folgenden Feststellungen ist - gemäß den Untersuchungen VILLINGER's (1971) und den Beobachtungen aus den Markierungsversuchen von BEHRENS & SEILER (1981) - , daß jede Quelle ihr eigenes Einzugsgebiet hat, auch wenn ein großräumig zusammenhängender Grundwasserkörper vorliegt. Damit soll geprüft werden, ob der Verlauf von Faziesgrenzen die Berandung des unterirdischen Einzugsgebietes beeinflußt. Als geologische, hydraulisch wirksame Barrieren kommen in Frage:

- Die ton- und mergelreichen Schichten an der Basis des Malm Alpha und des Malm Gamma. Sie bilden horizontale, schwach nach Süden einfallende Grenzflächen. Die Quellen des Anlautertales liegen alle im Malm Alpha und die des Altmühltals, mit Ausnahme der Malm Gammaquellen von Isenbrunn und Regelmannsbrunn, alle im Malm Delta. Damit sind zumindest für den südlichen Teil des Anlauterabschnitts die Gammamergel als weitgehend oder teilweise stauende Schichten von Bedeutung.
- Als seitliche, hydraulische Berandung kommen laterale Fazieswechsel in Frage (Abb. 26), wie sie im Untersuchungsgebiet mit seinen Schwammriffen, der Riffrandfazies und den Wannensedimenten häufig zu finden sind und sich bereits in den Markierungsergebnissen (siehe Kap. 3.1) andeuten. Über die resultierenden Schichtverbiegungen in der Schichtfazies und die Verteilung der Riffe liegen umfassende Arbeiten von STREIT (1963), EDLINGER (1964), ZEISS (1964), SCHNITZER (1965), FREYBERG (1968,1969) und MEYER (1977) vor. Insbesondere im Bereich der wasserungesättigten Karstzone kann die diagenetisch entstandene Schichtneigung die Sickerwasserbewegung entscheidend beeinflussen.

Es wird versucht, aus der mittleren Quellschüttung (Q_G) und der Grundwasserneubildungsrate (r_B) die Flächengröße (F) des Quelleinzugsgebietes zu berechnen mit:

$$F = Q_G / r_B \quad [m^2]$$

Dem wird die ausplanimetrierte, aus den Markierungsergebnissen erhaltene unterirdische Einzugsgebietsfläche gegenübergestellt. Zur Überprüfung und als Maß der Abweichung der beiden so erhaltenen Einzugsgebietsflächen wird aus der mittleren Schüttung jeder Quelle (Q_G) und der markierungstechnisch und geologisch ermittelten Einzugsgebietsfläche (F_{neu}) die Abflußspende (q_{neu}) berechnet:

$$q_{neu} = Q_G / F_{neu} \quad [1/(s \cdot km^2)]$$

und diese mit der meteorologisch ermittelten Grundwasserneubildungsrate (r_B) von $9.5 \text{ } 1/(s \cdot km^2)$ bzw. $8.0 \text{ } 1/(s \cdot km^2)$ verglichen. Dieser Vergleich erlaubt speziell bei aneinandergrenzenden unterirdischen Einzugsgebieten eine Aussage darüber, inwieweit der Verlauf der vorhandenen Faziesgrenzen die Berandung des Einzugsgebietes wiedergibt.

Die mittlere Schüttung der einzelnen Quellen konnte teilweise mit kontinuierlichen Pegelaufzeichnungen über 2-3 Jahre relativ genau bestimmt werden, teilweise mußten aber Abschätzungen aufgrund von fakultativen Einzelmessungen vorgenommen werden.

Trägt man die Grenzen der Einzugsgebiete unter Zuhilfenahme der Ergebnisse der Markierungsversuche von BEHRENS & SEILER (1981) in eine Karte mit den Faziesgrenzen ein (Abb. 6), so zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der meteorologisch ermittelten Grundwasserneubildungsrate von $9.5 \text{ } 1/(s \cdot km^2)$ und den aus den Quellschüttungen und den unterirdischen Einzugsgebietsflächen für jede Quelle rückgerechneten Abflußspenden, die zwischen 8.8 und $10 \text{ } 1/(s \cdot km^2)$ liegen. Diese Berechnung kann für den östlichen Teil des Anlauterabschnittes nahezu lückenlos erfolgen. Nur ca. $10 \text{ } km^2$ von $205 \text{ } km^2$ bleiben ohne Zuordnung zu einer Quelle. Diese Ungenauigkeit von 5% mag zwei Ursachen haben:

- Einmal liegt sie in einer Ungenauigkeit der Bestimmung des mittleren Abflusses der Quellen.
- Zum anderen ist bekannt, daß durch die Altmühlregulierung im Bereich Eichstätt-Kipfenberg die Quellen am nördlichen Talrand der Altmühl in ihrer Schüttung beeinflußt wurden. Auch in den Brunnen Walting I und II, die Wasser aus den Schichten unterhalb der Gammamergel fördern, war im Gefolge von Markierungen auf der Albhochfläche des Anlauterabschnittes ein Markierungsstoffdurchgang zu beobachten (BEHRENS & SEILER 1981). D.h., daß die Mergel des Malm Gamma nur eine partiell stauende Funktion haben und daß in diesem Gebiet die Geometrie des Grundwasserströmungsfeldes die stauende Funktion dieses Quellhorizontes noch unterstützt.

Die zuletzt getroffene Feststellung ist sicher wesentlich für die weitere Bewirtschaftung des Karstgrundwassers im Altmühltal, aber auch für den gegenwärtigen Schutz der Trinkwasserfassungen vor Abwässern, die im Anlauterabschnitt in den Karstgrundwasserkörper eingeleitet werden:

Im Anlauterabschnitt gelangen Verunreinigungsfahnen des Karstgrundwassers offensichtlich an den Gammamergeln zum Ausfluß. Nur ein geringer Teil dieser Schadstoffe gelangt auch in tiefere Gesteinsschichten und vermischt sich dort mit einem großen Grundwasservolumen. Aus diesen tieferen Gesteinsschichten beziehen aber die meisten Trinkwasserfassungen ihr Grundwasser. Bei zu starker Grundwasserentnahme und Veränderung des Grundwasserströmungsfeldes könnten die Gammamergel diese Schutzfunktion für tiefere Bereiche des Grundwassers nicht mehr ausüben; denn es ist aus der Literatur bekannt (z.B. VILLINGER 1977), daß die Gammamergel nur unvollkommene Grundwasserstauer sind.

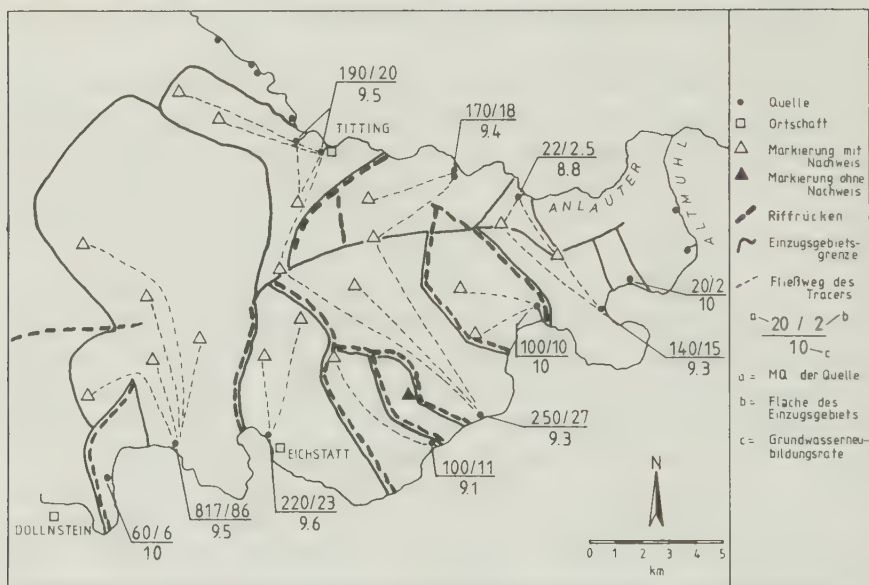


Abb. 6: Markierungsergebnisse und Bilanzierung im östlichen Teil des Anlauterabschnittes.

Jedes Einzugsgebiet einer Quelle kann offensichtlich einer Sedimentwanne, die von Riffen umgeben ist, zugeordnet werden; jede Markierung wurde daher auch nur in der Quelle nachgewiesen, in deren zugehöriger Sedimentwanne sie eingebracht worden war. Dies bestätigt die in Kap. 2 getroffene Feststellung, daß ein qualitativer Zusammenhang zwischen Faziesausbildung und Grundwasserbewegung besteht. Die Schichtfazies wirkt in diesem Gebiet sozusagen als Sammelstruktur für einsickernde Wässer, die ihre Wasserführung an einige wenige, diskrete und leistungsfähige Fließwege abgibt.

3.3 Zufluß von Grundwasser in die Talfüllungen von Vorflutern

Der Abflußzuwachs (dMQ) des Vorfluters in einem bestimmten Streckenabschnitt setzt sich aus dem Zufluß von Quellwasser (Q_Q) und dem unmittelbar dem Fluß über die Talfüllung zufließenden Grundwasser (Q_I) zusammen:

$$dMQ = Q_Q + Q_I \quad [m^3/s]$$

Dieser Abflußzuwachs entspricht wegen eines fehlenden Direktabflusses auch dem Produkt aus Grundwasserneubildungsrate (r_B) und Einzugsgebietsfläche (F):

$$dMQ = r_B * F \quad [m^3/s]$$

3.3.1 Zufluß von Grundwasser in die Talfüllung der Altmühl

Für den östlichen Anlauterabschnitt ist aus der fast flächendeckenden Verteilung der Einzugsgebiete der einzelnen Quellen und der Wasserbilanz für diese Quellen zu folgern, daß der größte Teil des neugebildeten Grundwassers über Quellen ausfließt (siehe Kap. 3.2).

Der Abflußzuwachs der Altmühl beträgt im Bereich zwischen Treuchtlingen und Beilngries als langjähriger Mittelwert $11.37 \text{ m}^3/s$ (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH 1982). Bei einem oberirdischen Zulauf aus den Quellen und Seitenbächen von $9.02 \text{ m}^3/s$ (Tab. 10) ergibt sich ein unterirdischer Zufluß in die Talfüllung der Altmühl von $2.35 \text{ m}^3/s$. Damit beträgt der Anteil des direkt der Talfüllung zufließenden Grundwassers am Gesamtabflußzuwachs der Altmühl - gemittelt über den ganzen Streckenabschnitt von Treuchtlingen bis Beilngries - nur ca. 20 %.

Da im östlichen Anlauterabschnitt der größte Teil des neugebildeten Grundwassers über Quellen ausfließt, müssen in anderen Streckenabschnitten weit mehr als 20 % des neugebildeten Grundwassers der Talfüllung direkt zufließen. Hierzu ist bemerkenswert, daß der Bereich von Pappenheim bis Dollnstein mit einer Tallänge von ca. 15000 m ohne erhebliche Quellzuflüsse aus Norden (aus dem Anlauterabschnitt) und der Bereich von Dollnstein bis Pfünz mit einer Tallänge von ca. 20000 m ohne Quellzuflüsse aus Süden (aus dem Donauabschnitt) ist. Es ist daher zu vermuten, daß gerade in diesen Bereichen ein verstärkter unterirdischer Zufluß in die Talfüllung der Altmühl erfolgt.

Zur Überprüfung dieser Vermutung wird versucht, den Abflußzuwachs der Altmühl von $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ anhand einer überschlägigen Berechnung des Grundwasseraufnahmevermögens der Talfüllung in den Talabschnitten Pappenheim - Dollnstein und Dollnstein - Pfünz mit einer Gesamtlänge von 35000 m zu überprüfen. Dazu ist die Kenntnis folgender Parameter nötig:

- Länge der Talfüllung,
- Geometrie der Berandung der Talfüllung,
- Durchlässigkeit (k_f) der Sedimente in der Talfüllung,
- Grundwassergefälle (i) zum Vorfluter hin.

Zur Vereinfachung wird ein kastenförmiger Querschnitt der Talfüllungen mit der Mächtigkeit (H) der wassergesättigten Talfüllung und einer mittleren Talbreite (B) von 200 m angenommen. Das Grundwasseraufnahmevermögen der Talfüllung (I_{pot}) berechnet sich für eine Tallänge (l) mit :

$$I_{\text{pot}} = (2 \cdot H + B) \cdot k_f \cdot i \cdot l \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Für den Bereich Treuchtlingen - Beilngries ergeben 21 Bohrprofile von in den Talfüllungen stehenden Trinkwassergewinnungsanlagen eine mittlere Mächtigkeit der gesamten Talfüllung von 13.7 m (Tab. 6). In den Gebieten, in denen keine Bohrungen auswertbar waren, wurde die Tiefenlage der Felsoberkante mit Hilfe der Hammerschlagrefraktionsseismik (siehe Kap. 8.3) bestimmt. Die Auswertung von 24 seismischen Profilen ergibt eine mittlere Mächtigkeit der Talfüllung von 14.5 m (Tab. 7). Die mittlere wassergesättigte Mächtigkeit wurde mit 11.2 m aus den Wasserständen in den Bohrungen ermittelt. Die Durchlässigkeit der Altmühlkiese wird mit $2 \cdot 10^{-3}$ m/s angenommen, wie sie aus Pumpversuchen in den Altmühlkiesen bei Gungolding errechnet worden ist (BEHRENS et al. 1983). Für das Grundwassergefälle in der Talfüllung zum Vorfluter hin wird mit dem Wert des Talgefälles von $5 \cdot 10^{-4}$ gerechnet.

Das Grundwasseraufnahmevermögen der Talfüllung der Altmühl pro Meter Tallänge ergibt sich somit aus

$$I_{\text{pot}} = (2 \cdot 11.2 + 200) \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

zu $2.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Für den Fall eines einseitigen Zuflusses von Norden im Bereich Pappenheim - Dollnstein und von Süden im Bereich Dollnstein - Pfünz kann von einem halbierten Durchflußquerschnitt und damit von einem Aufnahmevermögen pro Meter Tallänge von $1.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ausgegangen werden. Ein Zufluß von Grundwasser direkt in die Talfüllung der Altmühl in Höhe von $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ erfordert folglich eine Tallänge von mindestens 23500 m. Diese berechnete Tallänge stimmt in etwa mit der Länge der quellarmen und -freien Talabschnitte von 35000 m überein, was bedeuten würde, daß die Einzugsgebiete dieser Talabschnitte zu einem Großteil direkt in die Talfüllung der Altmühl entwässern. Berücksichtigt man, daß nicht der gesamte Talquerschnitt als Durchflußfläche für aufstoßendes Karstgrundwasser zur Verfügung steht, z.B. wenn sperrende Tonschichten in die Talfüllung eingelagert sind, so

erfordert der Grundwasserzufluß von $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ sogar eine größere Tallänge als 23500 m, und die diesen Talabschnitten zugehörigen unterirdischen Einzugsgebiete würden nahezu komplett in die Talfüllung entwässern.

Diese überschlägige Rechnung gibt einen quantitativen Hinweis darauf, daß im Untersuchungsgebiet einerseits zwar Grundwasserneubildungsbereiche existieren, die fast ausschließlich über Quellen entwässern und die sich durch einen Reichtum an schüttungsstarken Quellen auszeichnen (z.B. im östlichen Anlauterabschnitt). Andererseits gibt es auch Grundwasserneubildungsbereiche, die hauptsächlich direkt in die Talfüllung der Altmühl entwässern und die auch durch das Fehlen schüttungsstarker Quellen gekennzeichnet sind.

3.3.2 Zufluß von Grundwasser in die Talfüllung der Donau

Der in die Donau entwässernde Teil des Untersuchungsgebietes wurde östlich der Linie Ingolstadt - Friedrichshofen - Arnsberg auf einer Flußlänge von 46000 m, d.h. bis nach Kelheim, bilanziert. Für die Einzugsgebietsfläche von 500 km^2 beträgt die Grundwasserneubildung in diesem Gebiet $500 * 8 * 10^{-3} = 4.0 \text{ m}^3/\text{s}$, wovon ca. $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tab. 9) oberirdisch über Quellen indirekt der Donau zufließen. Es strömt also im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes nur ein Drittel des Grundwassers über Quellen aus, während zwei Drittel direkt der Donau zufließen. Ob diese Zuflüsse flächig in die weitgespannte Talfüllung der Donau übertreten oder an einzelnen, diskreten Punkten, kann hier nicht belegt werden.

3.4 Zusammenfassung zur Wasserbilanz

Für den Anlauterabschnitt wird von einer Grundwasserneubildungsrate von $9.5 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ und für den Donauabschnitt des Untersuchungsgebietes von $8.0 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ausgegangen. Wegen der Verkarstung bildet sich meist kein Direktabfluß über lange Strecken, und die Grundwasserneubildungshöhe entspricht der Abflußhöhe.

Im Anlauterabschnitt fließt zwischen Dollnstein und Grösdorf sowie im Raum Pappenheim der Großteil des Grundwassers über Quellen aus; nur ein kleiner Teil tritt vom Karst in das Grundwasser der Talfüllung über. Die Einzugsgebiete der einzelnen Quellen sind meist geologisch bestimmbar. Das Grundwasser wird in den durch atektonische Schichtverbiegung entstandenen Wannen der geschichteten Fazies geführt, und die Riffrücken, welche die Wannen seitlich begrenzen, bilden weitgehend die Einzugsgebietsgrenzen. Die Höhenlage der wasserstauenden Gammamergel zum Vorflutniveau und die Grundwasserentnahme aus Schichten des Malm Alpha und Beta haben einen entscheidenden Einfluß auf das Grundwasserströmungsfeld; denn die Gammamergel sind ein unvollkommener Grundwasserstauer, der hier aufgrund der Geometrie des Grundwasserströmungsfeldes als scheinbar vollkommener Grundwasserstauer wirkt.

Es gibt auch Grundwasserneubildungsbereiche, die hauptsächlich direkt in die Talfüllung der Altmühl entwässern und die durch das Fehlen schüttungsstarker Quellen gekennzeichnet sind, wie das im Anlauterabschnitt zwischen Pappenheim und Dollnstein und im nördlichen Donauabschnitt zwischen Dollnstein und Pfünz der Fall ist.

Im südlichen Donauabschnitt liegen keine grundwasserstauenden Schichten über Vorflutniveau. Zwei Drittel des Karstgrundwassers fließen hier direkt in die Talfüllung der Donau und nur ein Drittel über Quellen aus.

4. Isotopische und chemische Eigenschaften des Grundwassers

Im folgenden wird dargelegt, inwieweit das Nebeneinander der verschiedenen Umsatzräume sich auch in einer wechselnden isotopischen und chemischen Zusammensetzung des Grundwassers niederschlägt, insbesondere, welche räumliche Verteilung sich hier in Bezug auf die fazielle Gesteinsausbildung ergibt.

Da die Quellwässer meist nur in wöchentlichen bis monatlichen Abständen beprobt wurden, konnten sehr kurzfristige Veränderungen der isotopischen und chemischen Wasserinhaltsstoffe, wie sie z. B. BURGER (1983) darstellt, nicht beobachtet werden. Wenn aber für einzelne Quellen längere Meßreihen vorhanden sind, wie das bei den vorliegenden Werten für Tritium, Sauerstoff-18, elektrolytische Leitfähigkeit und Wassertemperatur der Fall ist, kann man in erster Näherung von der Streuung der Meßwerte in der Quelle auf die Bedeutung kurzfristiger Veränderungen im Stoffeintrag für die jeweilige Quelle schließen.

4.1 Isotopenuntersuchungen

Die Isotope ^3H und ^{18}O werden mit dem Niederschlag großflächig in das Grundwasser eingetragen. Durch die Untersuchung dieser Isotopengehalte eines Grundwassers erhält man Informationen über das Gesamtsystem der Grundwasserumsatzräume im unterirdischen Einzugsgebiet. Im Unterschied dazu liefern die Markierungsversuche im Untersuchungsgebiet im wesentlichen nur Informationen über einen Ausschnitt des Karstgrundwasserkörpers.

4.1.1 Tritium

Wegen des flächigen Eintrags von Tritium (^3H) ins Grundwasser kann man die Aufenthaltszeit des Tritiums nur durch eine mittlere Verweilzeit im Gesamtsystem angeben; denn bei den Quellwässern im Untersuchungsgebiet handelt es sich immer um Mischwässer aus voneinander hydraulisch sehr verschiedenen Grundwasserumsatzräumen, und die Schüttungsanteile aus den einzelnen Umsatzräumen im Quellwasser sind sicher großen zeitlichen Schwankungen unterworfen. Anders können die zum Teil starken Schwankungen in den Quellschüttungen nicht erklärt werden.

Für die Durchmischung des durch versickerungsfähige Niederschläge eingetragenen Tritiums im Grundwasser gibt es drei Grundmodelle, die sich durch den Grad der angenommenen Durchmischung voneinander unterscheiden. In der Folge immer besserer Durchmischung sind dies:

- das piston-flow-Modell,
- das Dispersionsmodell,
- das Exponentialmodell.

Das piston-flow-Modell geht davon aus, daß keine Mischung von verschiedenen Wasserteilchen erfolgt, also auch jede Konzentrationsänderung, molekulare Diffusion und hydrodynamischen Dispersion unterbleibt (MOSER & RAUERT 1980). Für die Beziehung zwischen dem mittleren Alter (t_a) und der mittleren Verweilzeit (T) des Wassers im Reservoir gilt:

$$t_a = T / 2$$

Das Exponentialmodell nimmt eine vollständige Mischung der einzelnen Wasserteilchen im Reservoir an, und es entspricht:

$$t_a = T$$

Deshalb errechnen sich mit dem piston-flow-Modell für eine gleiche Konzentration des Markierungsstoffes im Wasser in der Regel kleinere mittlere Verweilzeiten des Grundwassers als mit dem Exponentialmodell (Abb. 7).

Die sich mit dem Dispersionsmodell ergebenden mittleren Verweilzeiten liegen je nach der Größe der Dispersivität und der Länge der Fließstrecke mehr oder weniger zwischen den mit dem piston-flow-Modell und dem Exponentialmodell ermittelten Werten (Abb. 7) (MALOSZEWSKI & ZUBER 1983, SALVAMOSER 1982).

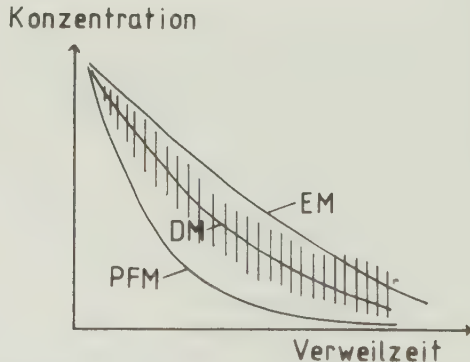


Abb. 7: Skizze: Mittlere Verweilzeiten für unterschiedliche Austragskonzentrationen, berechnet nach dem piston-flow-Modell (PFM), dem Exponentialmodell (EM) und dem Dispersionsmodell (DM) für einen bestimmten Probennahmezeitpunkt.

In der vorliegenden Arbeit wird von einem Exponentialmodell ausgegangen. Man erhält also in der Regel eine obere Grenze für die berechneten mittleren Verweilzeiten.

4.1.2 Räumliche Verteilung der Tritiumgehalte

Von nahezu allen Quell- und vielen Brunnenwässern im Untersuchungsgebiet liegen Bestimmungen des Tritiumgehaltes, meist sogar über längere Zeiträume, vor. Die Messungen erfolgten im GSF-Institut für Radiohydrometrie (Hr. RAUERT). Alle T.U.-Werte werden im folgenden immer auf das Jahr 1983 bezogen.

Die Meßgenauigkeit wurde zugunsten einer Vielzahl an Messungen in der Regel niedrig gewählt (2 Sigma bis über 20 T.U.). Die Zeitreihenauswertung kann daher nur einen Trend wiedergeben: Im allgemeinen sinken die Tritiumgehalte im Beobachtungszeitraum mit aufsteigender Jahreszahl. Hohe Tritiumgehalte deuten im Untersuchungsgebiet in der Regel auf kleine mittlere Verweilzeiten und niedrige Tritiumgehalte auf große mittlere Verweilzeiten hin. Sie bewegen sich je nach Region zwischen ca. 100 T.U. und 0 T.U. (Abb. 27 und Tab. 12). Nur bei Wässern mit ausschließlich ganz jungen Komponenten wären in etwa die gleichen Tritiumgehalte wie in den Niederschlägen (Tab. 11) zu erwarten. Davon kann im Untersuchungsgebiet aber nicht ausgegangen werden; denn auch nach sehr langen Trockenwetterperioden kommt keine der untersuchten Quellen zum Versiegen. Es gibt also Quellen, deren Wasser mehr oder weniger frei von ^3H ist und damit eine mittlere Verweilzeit von mehr als ca. 150 Jahren nach dem Exponentialmodell und ca. 30 Jahren nach dem piston-flow-Modell besäße.

Die Tritiumgehalte in Quellwässern und Brunnen zeigen eine bestimmte räumliche Verteilung. Generell ist im Untersuchungsgebiet eine Abnahme der Tritiumgehalte von Norden nach Süden zu beobachten (Abb. 27). Quellwässer mit Tritiumgehalten unter 30 T.U. haben nach dem Exponentialmodell mittlere Verweilzeiten von über ca. 100 Jahren; sie befinden sich entweder im Süden des Untersuchungsgebietes entlang der Donau, oder aber ihre Einzugsgebiete liegen in den Riffkomplexen südlich der Altmühl. Tritiumgehalte über 60 T.U. treten

hauptsächlich in den Quellwässern im Anlauterabschnitt des Untersuchungsgebietes auf. Ihnen entsprechen nach dem Exponentialmodell mittlere Verweilzeiten von einigen Jahren (Abb. 20). Die Abnahme der Tritiumgehalte von Nord nach Süd hat wohl folgende Gründe:

1. Die Grundwassermächtigkeit nimmt im Untersuchungsgebiet aufgrund der nach S einfallenden Grundwassersohlschicht des Malms von 0 m im Norden bis auf über 300 m im Süden zu. Aus diesem größeren Wasservolumen im Süden resultieren dann auch höhere mittlere Verweilzeiten in diesem Bereich.
2. Die Grundwasserbewegung erfolgt im Untersuchungsgebiet in verschiedenen Grundwasserumsatzräumen. Im Süden des Untersuchungsgebietes sind große Gebietsflächen durch die tertiäre Überdeckung plombiert. D.h., Karsthölräume entfalten hier nicht oder nur noch örtlich ihre drainierende Wirkung auf das umgebende Grundwasser. Die unterschiedliche hydraulische Wirksamkeit der einzelnen Umsatzräume manifestiert sich übrigens auch in den Schüttungsschwankungen der Quellen, die ein ähnliches Verhalten wie die Tritiumgehalte zeigen: Je kleiner die Schüttungsschwankung ist, desto kleiner sind die Schwankung in den Tritiumgehalten und die Tritiumgehalte selbst.
3. Darüber hinaus besteht auch ein Zusammenhang zwischen dem Tritiumgehalt und der Gesteinsfazies. In den Riffkomplexen treten oft wesentlich kleinere Tritiumgehalte als in der geschichteten Fazies auf. In der Riffazies dominieren offensichtlich die Umsatzräume mit langsamer und in der geschichteten Fazies die mit schneller Grundwasserbewegung. Die räumliche Verteilung der Tritiumgehalte und ihre Abhängigkeit von der Gesteinsfazies bestätigen somit das, was aufgrund der

Ergebnisse der Markierungsversuche zur faziesbedingten Verteilung der Grundwasserumsatzräume abgeleitet wurde: Die mittleren Verweilzeiten sind in der Riffazies höher als in der geschichteten Fazies (siehe Kap. 2).

4. Grundwasserumsatzräume mit unterschiedlichen mittleren Verweilzeiten bestehen offensichtlich nicht nur übereinander (APEL 1971). Sie müssen auch nebeneinander bestehen. Nur so läßt sich ein Markierungsstoffdurchgang in der Quelle Grösdorf wenige Tage nach der Markierung in Gelbelsee erklären, obwohl der Tritiumgehalt des Quellwassers nur ca. 22 T.U. (Tab. 12) beträgt.

In nichtverkarstungsfähigen Kluftgesteinen nimmt in der Regel die Durchlässigkeit zur Tiefe hin ab, da die Kluftweiten ebenfalls abnehmen (SEILER 1968). Betrachtet man die Tritiumgehalte im Grundwasser aus Brunnen, die ja tiefere Bereiche des Grundwassers erschließen, so zeigt sich im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes praktisch kein Unterschied zu den Tritiumgehalten der Quellen im gleichen Bereich. Dies kann zwei Ursachen haben:

- Entweder sind im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes vertikale Durchlässigkeitsunterschiede des Karstgrundwasserkörpers vernachlässigbar klein,
- oder in den Brunnenbohrungen besteht ein hydraulischer Kurzschluß über Klüfte zwischen dem tieferen Teil des Grundwassers und den sehr jungen, oberflächennahen Grundwässern, der auch durch lange, einzementierte Vollrohrtouren nicht verhindert werden kann.

Gleich welcher Deutung man den Vorzug gibt, erhebt sich die Frage, inwieweit es sinnvoll ist, in diesem Bereich des Untersuchungsgebietes besonders tiefe Brunnen zur Trinkwassergewinnung zu bohren, da trotz tiefer Position der Filterstrecke Wasser annähernd gleicher mittlerer Verweilzeit wie in den Quellen gefördert wird.

4.1.3 Sauerstoff-18

Sauerstoff-18 wird ebenfalls großflächig mit dem Niederschlag ins Grundwasser eingetragen. Die ^{18}O -Gehalte im Niederschlag weisen eine jahreszeitliche Schwankung mit hohen Werten im Sommer und geringen Werten im Winter auf (MOSER & RAUERT 1980). Die jährliche Schwankungsbreite liegt bei ca. 10 ‰ d ^{18}O . Im Grundwasserkörper wird diese Eintragsfunktion in ihrer Amplitude gedämpft und phasenverschoben (STICHLER & HERRMANN 1982). Aus dem Grad der Dämpfung und der Phasenverschiebung kann man auf die Verweilzeit des Wassers im Grundwasserkörper schließen (MOSER & RAUERT 1980). Aus dem Verhältnis der Amplitude der Eintragsfunktion (D_N) zur Amplitude der Austragsfunktion (D_G) errechnet sich die mittlere Verweilzeit (T) zu :

$$T = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{D_N^2}{D_G^2} - 1} \quad [\text{Zeit}]$$

Für die meisten Quellen im Untersuchungsgebiet wurden die ^{18}O -Gehalte über mehrere Jahre hinweg bestimmt. Die Messungen erfolgten im GSF-Institut für Radiohydrometrie (Hr. STICHLER). Der mittlere ^{18}O -Gehalt aller Grundwasserproben liegt bei -9.96 ‰ d ^{18}O mit einer Standardabweichung von ± 0.66 . Der Jahresmittelwert des ^{18}O -Gehaltes in den Niederschlägen liegt in diesem Gebiet im Mittel bei -9.95 ‰ d ^{18}O (mündl. Mitt. Hr. STICHLER). Daraus könnte man schließen, daß

in den Quellwässern der gesamte ^{18}O -Gehalt der Niederschläge über das ganze Jahr wieder zum Austrag kommt und die Grundwasserneubildung im Sommer und Winter gleich stark wäre. Dem widerspricht aber die Tatsache, daß im Untersuchungsgebiet mit einer verminderten Grundwasserneubildung im Sommer zu rechnen ist (siehe Kap. 3.1 und Kap. 6). Durch den größeren Einfluß der ^{18}O -Gehalte des Winterhalbjahres müßte sich der Jahresmittelwert im Grundwasser dann zu leichteren Werten verschieben. Möglicherweise spielen hier Verdunstungs- und Fraktionierungseffekte in der Bodenzone eine gewisse Rolle; ihnen kann aber im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter nachgegangen werden.

Die Austragsfunktion des ^{18}O -Gehaltes im Grundwasser zeigt eine nahezu vollständige Dämpfung der Eintragsfunktion. Ein Jahresgang ist fast nicht festzustellen. Im Mittel deuten sich im Frühjahr geringere Werte als im Herbst, also eine Phasenverschiebung der Eintragsfunktion um ca. 3-4 Monate an (Tab. 14). Bezüglich der mittleren Verweilzeit kann daraus nur geschlossen werden, daß diese größer als einige Wochen ist (STICHLER & HERRMANN 1982). Aus der Amplitude der Austragsfunktion mit ca. 0.2 ‰ d^{18}O und der Amplitude in den Niederschlägen mit ca. 3.9 ‰ d^{18}O errechnet sich eine mittlere Verweilzeit des Grundwassers von größer 3 Jahren. Die kurzzeitigen Konzentrationsschwankungen in den ^{18}O -gehalten sind im allgemeinen aber so gering, daß man eine große Pufferwirkung des Grundwasserkörpers annehmen muß. Sehr kurzfristige Konzentrationsänderungen, wie sie aufgrund der Markierungsversuche (siehe Kap. 2) und Schüttungsbeobachtungen bei einem Teil der Quellen zu vermuten sind, können hier nicht diskutiert werden, da die Probennahmeabstände dafür zu groß sind.

Regionale Unterschiede in den ^{18}O -Gehalten und in den zeitlichen Veränderungen des ^{18}O -Gehaltes sind nicht feststellbar: Auch in Gebieten, in denen Umsatzräume mit schneller Fließbewegung nach den Ergebnissen der Markierungsversuche eine relativ große Rolle spielen (siehe Kap. 2 und 4.1.1), dominieren die Umsatzräume mit langsamer Fließbewegung den Grundwasserumsatz (siehe Kap. 5.3).

4.2 Ergebnisse zur Chemie der Grundwässer

4.2.1 Elektrolytische Leitfähigkeit

Die elektrolytischen Leitfähigkeiten der Quellwässer wurden über mehrere Jahre hinweg in meist monatlichen Abständen gemessen. Kontinuierliche Aufzeichnungen liegen nicht vor.

Die elektrolytische Leitfähigkeit spiegelt die gesamte Mineralisation des Wassers wider (siehe Kap. 4.2.2). Durch starke Niederschläge kann es zu einer Konzentrationsverringerung des Lösungsinhaltes im Grundwasser kommen; deshalb läßt sich in Karstquellen oft beobachten, daß die elektrolytische Leitfähigkeit bei hohen Schüttungen gering und bei niedrigen Schüttungen hoch ist (BURGER 1983).

In Quellen, die keine großen Schwankungen in den elektrolytischen Leitfähigkeiten aufweisen, d.h., deren Standardabweichung der elektrolytischen Leitfähigkeit kleiner als 15 uS/cm ist - das entspricht in etwa der Meßgenauigkeit -, drückt sich eine unmittelbare Beeinflussung durch Niederschläge nur sehr gedämpft aus. Die Wirksamkeit der Umsatzräume mit schneller Fließbewegung muß demnach sehr klein sein. Solche Quellen werden alle mehr oder weniger allein aus den Grundwasserumsatzräumen mit langsamer Fließbewegung gespeist: In all diesen Quellen im Untersuchungsgebiet wurde bei Markierungsversuchen noch nie ein Markierungsstoff nachgewiesen,

obwohl er bei bestimmten Markierungen dort eigentlich zu erwarten gewesen wäre.

In diesen Quellen - z.B. Pfünz, Lohmühle, Kipfenberg - zeigt sich der dominierende Einfluß der Umsatzräume mit langsamer Fließbewegung auch in ihrem Schüttungsverhalten. Selbst starke und andauernde Niederschläge oder die Schneeschmelze machen sich hier meist nur in einem allmählichen Schüttungsanstieg bemerkbar. Ebenso langsam erfolgt in Trockenwetterzeiten der Schüttungsrückgang, und auch die Schüttungsschwankungen dieser Quellen sind vergleichsweise gering. Die Tritiumgehalte dieser Quellen sind sehr niedrig (siehe Kap. 4.1.2).

So erweist sich die Methode der Leitfähigkeitsmessung gemeinsam mit den Tracertechniken als ein einfaches Mittel, um Grundwässer mit hohen Anteilen aus den Umsatzräumen mit langsamer Fließbewegung von solchen mit geringen Anteilen qualitativ zu unterscheiden.

4.2.2 Kalzium und Magnesium

Während einer Niedrigwasserperiode wurden für 92 Quellen im Untersuchungsgebiet die Kalzium- und Magnesiumgehalte bestimmt (Abb. 28).

Für die Wasserproben zeigt sich eine erwartungsgemäß hohe Korrelation zwischen der Summe aus Kalzium und Magnesium, den Hauptinhaltsstoffen im Grundwasser neben dem Bikarbonat, einerseits und der gemessenen elektrolytischen Leitfähigkeit (siehe Kap. 4.2.1) andererseits (Abb. 8).

Ca+Mg <mg/l>

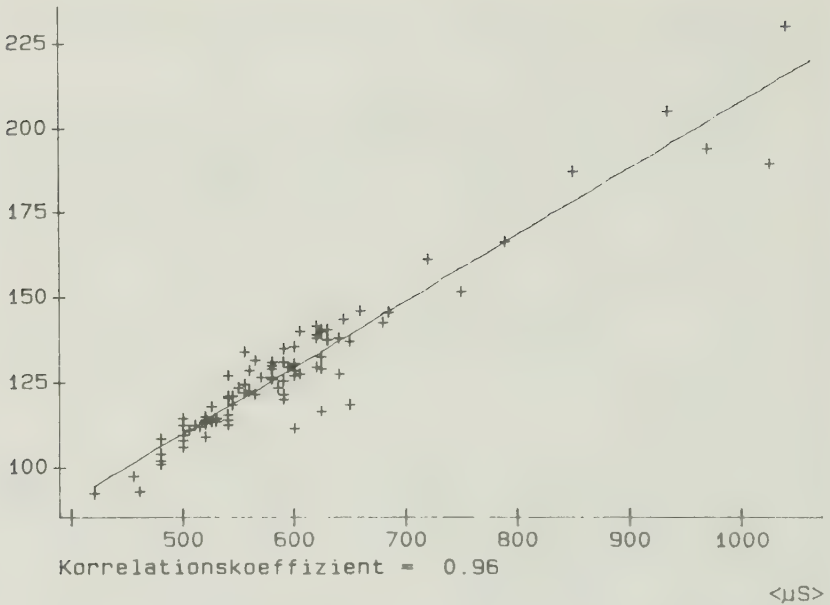


Abb. 8: Korrelationsdiagramm von Kalzium + Magnesium mit der elektrolytischen Leitfähigkeit für Quellwässer der Südlichen Frankenalb.

In den Kalzium- und Magnesiumgehalten der beprobten Grundwässer gibt es jedoch Unterschiede. Hierfür sind zwei Ursachen anzuführen:

- Die Lösung geschieht in dolomitischen oder kalzitischen Gesteinen,
- Die Intensität des Lösungsprozesses ist unterschiedlich.

Beide Ursachen spielen im Untersuchungsgebiet eine Rolle:

- Im Norden des Untersuchungsgebietes treten eher höhere elektrolytische Leitfähigkeitswerte als im Süden auf (Abb. 29). Man kann daraus folgern, daß die Intensität des Lösungsprozesses und damit der gegenwärtige Verkarstungsprozeß im Norden stärker als im Süden ist. Da im Norden die Umsatzräume mit schneller Fließbewegung einen größeren Einfluß auf den Grundwasserumsatz als die mit langsamer Fließbewegung nehmen (siehe Kap. 2 und Kap. 4.1), ist für die Gesteinskorrosion hauptsächlich der Einfluß der Umsatzräume mit schneller Fließbewegung verantwortlich. Die Wirksamkeit der Umsatzräume mit schneller Fließbewegung verstärkt sich also noch von selbst, und es entsteht der karsttypische, große Kontrast in den Grundwasserfließgeschwindigkeiten.
- Magnesium und Tritium sind in den untersuchten Quellen negativ, Kalzium und Tritium dagegen positiv korreliert (Abb. 9). Offensichtlich haben magnesiumreiche Quellwässer relativ hohe Schüttungsanteile aus den Umsatzräumen mit langsamer Fließbewegung. Die Lösung von Dolomit erfolgt bekanntlich auch langsamer als jene von Kalzit. Daraus ergibt sich aber auch, daß die drainierenden Grundwasserfließwege in der dolomitisierten Fazies des Untersuchungsgebietes eine geringere Bedeutung haben als in der kalzitischen. Diese Folgerung wurde bereits aus den Ergebnissen der Karstwassermarkierung gezogen (siehe Kap. 2) und läßt sich durch einfache chemische und isotopische Untersuchungen hier bestätigen.

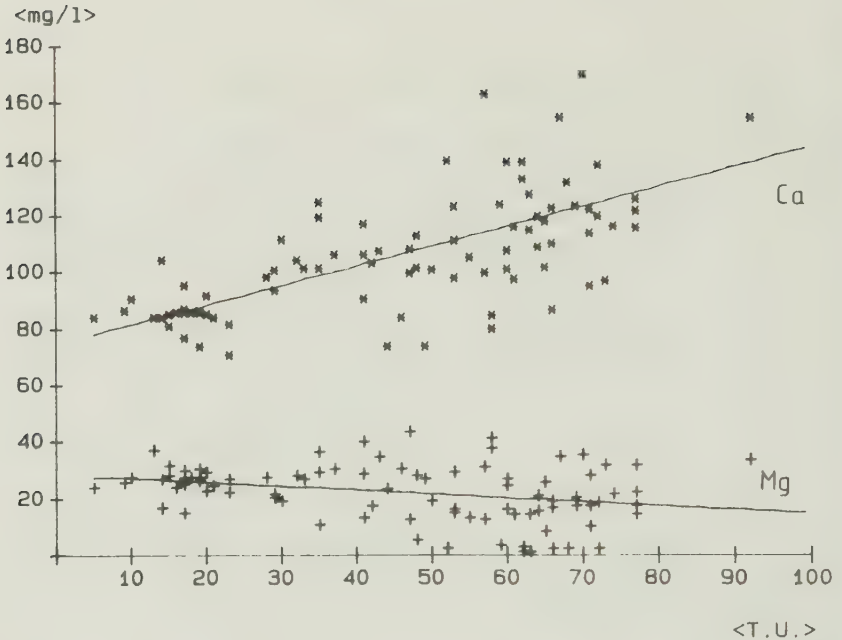


Abb. 9: Korrelationsdiagramme Kalzium gegen Tritium und Magnesium gegen Tritium.

4.3 Grundwassertemperaturen

Die Grundwassertemperaturen wurden in meist monatlichen Abständen gemessen. Kontinuierliche Aufzeichnungen liegen nicht vor.

Die Temperaturen der Quellwässer variieren in einem sehr engen Bereich von maximal ± 0.5 °C um einen Mittelwert von ca. 9.5 °C. Ein Jahresgang in den Wassertemperaturen mit niedrigen Temperaturen im Winter und hohen im Sommer (BURGER 1983) konnte nur in solchen Quellen beobachtet werden, die auch in ihrem Schüttungsverhalten spontane Reaktionen auf veränderliche Niederschlagsverhältnisse zeigen (siehe Kap. 4.1.2). Bei

vielen Quellen ist ein Jahresgang überhaupt nicht festzustellen. Offensichtlich ist der Einfluß der jahreszeitlich veränderlichen Lufttemperatur auf die Grundwassertemperaturen im Rahmen der Meßgenauigkeit (± 0.1 °C) bei diesen Quellen vernachlässigbar, da der Einfluß von Umsatzräumen mit schneller Fließbewegung dort sehr gering ist.

4.4 Zusammenfassung zu den isotopischen und chemischen Eigenschaften des Grundwassers

Die Quellwässer wurden auf ihren Gehalt an Tritium, Sauerstoff-18, Kalzium, Magnesium, ihre Temperatur und ihre elektrolytische Leitfähigkeit hin untersucht.

Je mehr Grundwasser in Räumen mit langsamer Fließbewegung umgesetzt wird, desto träger und gedämpfter reagieren die Quellen auf veränderte Eintragsbedingungen:

- Es zeigt sich eine signifikante räumliche Verteilung bezüglich des Tritiumgehalts mit hohen Tritiumgehalten im Norden und niedrigen im Süden des Untersuchungsgebietes. In der meist dolomitisierten Riffazies treten niedrigere Tritiumgehalte als in der geschichteten Fazies auf.
- Die Umsatzräume mit schneller Fließbewegung spielen hydrodynamisch im Norden des Untersuchungsgebietes eine größere Rolle als im Süden und in der geschichteten Fazies eine größere als in der Riffazies. Auf einen stärkeren Einfluß von Umsatzräumen mit langsamer Fließbewegung in der Riffazies deuten auch relativ hohe Magnesiumgehalte bei gleichzeitig niedrigen Tritiumgehalten und niedrige Magnesiumgehalte bei hohen Tritiumgehalten hin.

- Dieser regional unterschiedliche Einfluß von Umsatzräumen mit schneller Fließbewegung und solchen mit langsamer Fließbewegung kommt auch in den unterschiedlichen Schwankungen der elektrolytischen Leitfähigkeiten der Wässer zum Ausdruck.
- Die Temperaturen der Quellwässer variieren in einem sehr engen Bereich von maximal ± 0.5 °C um einen Mittelwert von 9.5 °C.

5. Trockenwetterabflußanalyse

Der Trockenwetterabfluß ist definiert als der "Abfluß in niederschlagsarmer Zeit, der den natürlichen oberirdischen und unterirdischen Speicherräumen des Einzugsgebietes entstammt" (DIN 4049). Die Trockenwetterganglinie (TWL) spiegelt im Karst nur das Auslaufgeschehen aus dem Grundwasserkörper abhängig von seinem jeweiligen Füllstand wider, da ein Direktabfluß fehlt.

5.1 Einleitung

Isotopenhydrologische Untersuchungen an Grundwässern der Südlichen Frankenalb erbringen mittlere Verweilzeiten der Grundwässer von mehreren Monaten bis zu vielen Jahren (siehe Kap. 5.1.2). Gleichzeitig ist in denselben Quellen bei Markierungen ein Markierungsstoffnachweis oft schon nach wenigen Stunden oder Tagen möglich. Daraus ist zu schließen, daß es sich bei dem Quellwasser in Wirklichkeit um verschiedenen alte, miteinander gemischte Grundwässer handeln muß. Einer der Grundwasseranteile hat ein hohes Alter, fließt also sehr langsam, ein anderer fließt sehr schnell und transportiert den Markierungsstoff in seiner Gesamtheit oder in Teilmengen sehr schnell. In der Mischung ergibt sich dann trotz eines schnellen Markierungsstoffdurchgangs eine mittlere Verweilzeit von einigen Jahren.

Nun ist bei Markierungen oft beobachtet worden, daß die Markierungsstoffrückgewinnung in kurzer Zeit an die 100 % erreichen kann (BEHRENS & SEILER 1981). Dies läßt sich dadurch erklären, daß die Markierungsstoffe im Gebiet der Südlichen Frankenalb meist in Dolinen, d.h. in das verkarstete Kluftsystem, eingegeben wurden und damit kein direkter Eintrag in den Teil des Karstkörpers mit langsamer Fließbewegung erfolgte. Bei Markierungen erhält man deswegen in erster Linie nur

Informationen über den Teil des Karstgrundwasserkörpers mit schneller Grundwasserbewegung. Im Gegensatz dazu findet bei dem großflächigen Eintrag eines Stoffes, z.B. von ^3H , mit dem Niederschlag stets ein Eintrag in den gesamten Karstkörper statt. Nur dort, wo die Karstoberfläche durch kaum durchlässige Schichten mehr oder weniger plombiert ist und sich ein Direktabfluß einstellt, der in Dolinen versickert, ergibt sich auch aus der Messung des Gehaltes an Umweltisotopen ein ähnliches Ergebnis wie bei den Markierungsversuchen. Dieser Sonderfall tritt aber im Untersuchungsgebiet praktisch nicht auf.

Das Nebeneinander verschiedener Grundwasserumsatzräume erfordert die Quantifizierung der Volumina der einzelnen Umsatzräume im Verhältnis zum gesamten Karstgrundwasserkörper und die Quantifizierung der zeitlich variablen Abflußanteile aus den einzelnen Umsatzräumen am Gesamtabfluß einer Quelle. Wegen der Mehrdeutigkeit bei der Umrechnung von Tritiumgehalten in mittlere Verweilzeiten (SALVAMOSER 1982) (Abb. 20) und der generellen Schwierigkeit bei der Berechnung von kurzen mittleren Verweilzeiten mit Hilfe des Tritiumgehaltes wird versucht, die Charakterisierung der Grundwasserumsatzräume im Karst durch eine Analyse des Trockenwetterabflusses der Quellen zu erreichen.

Gegenüber anderen Methoden hat die Analyse des Trockenwetterabflusses den Vorteil, daß keine Eintragsfunktionen bekannt sein müssen, deren detaillierte Kenntnis (lokale Niederschlagsdaten, z.B. für Gewitter) auch schwierig zu erreichen wäre.

Bei den im Untersuchungsgebiet für die Trockenwetterabflußanalyse ausgewerteten Pegelaufzeichnungen handelt es sich um Quellpegelganglinien. Deswegen kann die auf das Abflußgeschehen ausgleichende Wirkung langer Fließstrecken in den Vorflutern außer acht gelassen werden. Die Trockenwetterganglinie gibt also allein das Verhalten der unterirdischen Umsatzräume wieder.

5.2 Modellvorstellung

Betrachtet man den Ausfluß aus einem Gefäß, so besteht im einfachsten Fall ein linearer Zusammenhang zwischen der Schüttung und dem Wasservolumen jeweils zur Zeit t . Die Schüttung ($Q(t)$) ist proportional dem Wasservolumen ($V(t)$) im Gefäß. Die Proportionalitätskonstante ist die mittlere Verweilzeit (T):

$$V(t) = T * Q(t) \quad [m^3]$$

Unter Berücksichtigung der Kontinuitätsbedingung

$$Q(t) = -dV(t)/dt \quad [m^3/s]$$

läßt sich dieser Zusammenhang auch als Exponentialfunktion darstellen mit der Schüttung zur Zeit t als Funktion der Anfangsschüttung und der mittleren Verweilzeit:

$$\begin{aligned} Q(t) &= -T * dQ/dt \\ &= Q_0 * e^{-t/T} \end{aligned}$$

mit: Q_0 = Anfangsschüttung zur Zeit t_0 .

Der Exponentialkoeffizient $1/T$, im folgenden auch mit a bezeichnet, entspricht dann dem Steigungsmaß der Geraden im halblogarithmischen Diagramm. In der Literatur findet sich für die Bezeichnung des Steigungsmaßes (a) auch der Buchstabe α .

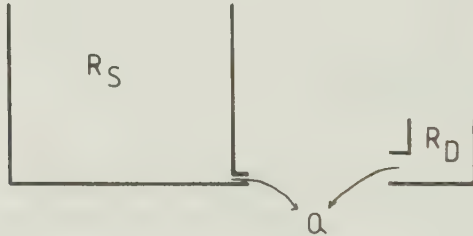


Abb. 10: Skizze von parallel geschaltetem Speicherraum und Drainageraum.

<u>Beispiele:</u> R_S und R_D voll :	großes Q , langsamer Schüttungsabfall
R_S voll, R_D leer:	kleines Q , langsamer Schüttungsabfall
R_S leer, R_D voll:	großes Q , sehr schneller Schüttungsabfall.

Bei einer Schüttung, die sich aus einem Ausfluß aus 2 Gefäßen mit unterschiedlichen mittleren Verweilzeiten zusammensetzt, ist das Schüttungsverhalten abhängig vom jeweiligen Füllstand der einzelnen Gefäße (Abb. 10). Es gilt:

$$Q(t) = Q_1(t) * e^{-a_1 t} + Q_2(t) * e^{-a_2 t} \quad [m^3/s]$$

Analysiert man den Trockenwetterabfluß einer Quelle, so zeigt sich, daß dieser in einzelne Zeitabschnitte unterteilt werden kann, die jeweils durch ein lineares Auslaufverhalten beschrieben werden können. Der einzelne Trockenwetterabfluß einer Quelle entspricht damit einer zusammengesetzten, abschnittsweise definierten Exponentialfunktion. Hierin drückt sich der heterogene Aufbau des Gesteins und der daraus resultierende Einfluß unterschiedlicher Umsatzräume aus. Auch das Schüttungsverhalten der Quelle ist abhängig vom jeweiligen Füllstand der einzelnen Umsatzräume. Bereits NATERMANN (1951) stellt fest, daß für eine Quelle, abhängig vom jeweiligen Füllstand, verschiedene Trockenwetterganglinien zustande kommen (siehe auch SCHOELLER 1965).

Zur Auswertung des Trockenwetterabflusses wird hier nicht auf das herkömmliche Verfahren einer graphischen Einpassung von Hand zurückgegriffen. Statt dessen wurde ein Rechenprogramm erstellt, mit dem sich sowohl der bezüglich des Wettergeschehens im Untersuchungszeitraum häufigste Trockenwetterabfluß als auch Abflußkurven für extreme Füllstände des Karstgrundwasserkörpers auswerten lassen (Abb. 11). Es wird nicht nur die Hüllkurve (WUNDT 1953, RICHTER & LILLICH 1975, ATKINSON 1977, BURGER 1983) betrachtet, bei deren Erstellung die steilen, herausragenden Kurvenäste verworfen werden, sondern alle Teile der Trockenwetterganglinien einer Quelle (Abb. 12).

Um den Unterschied zwischen Trockenwetterganglinien von Karstquellen und jenen von Flüssen aufzeigen zu können, wurden auch die Pegel der Altmühl bei Treuchtlingen und der Sulz bei Berching ausgewertet.

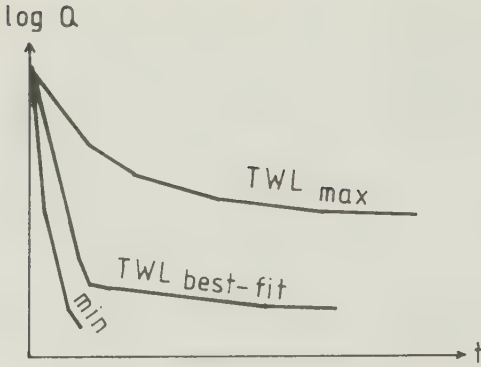


Abb. 11: Skizze: Ergebniskurven der Trockenwetterabflußanalyse einer Quelle.

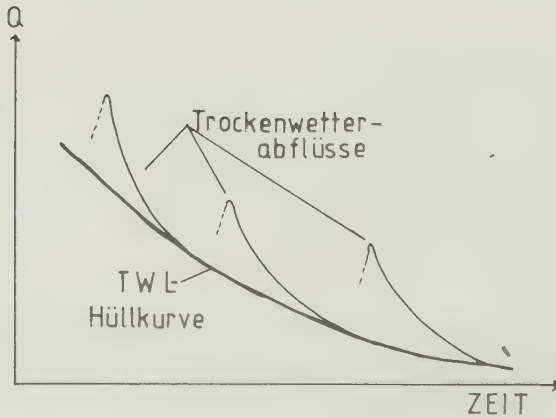


Abb. 12: Hüllkurve für Trockenwetterganglinie nach WUNDT 1953.

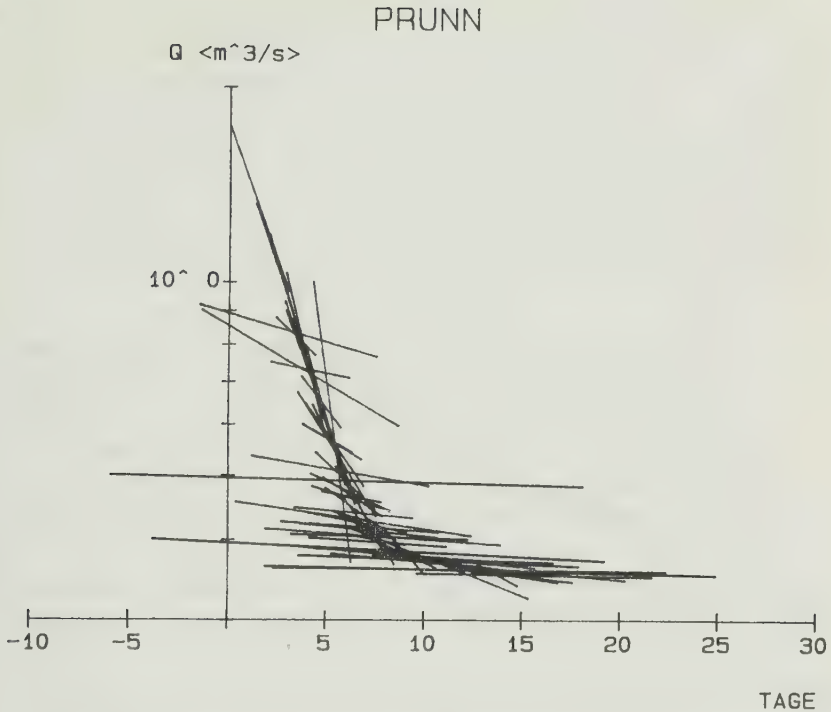


Abb. 13: best-fit-Berechnung für das Trockenwetterabflußgeschehen am Pegel Prunn. $t = 0$ Tage für höchsten Schüttungswert festgelegt.

Die best-fit-Kurven für den Trockenwetterabfluß der Quellen (Abb. 13) weisen meist einen scharfen Knickpunkt auf, was darauf schließen läßt, daß offensichtlich zwei hydraulisch sehr unterschiedliche Gruppen von Umsatzräumen für das Auslaufgeschehen bestimmend sind. Im Gegensatz dazu zeigen kleinere Flüsse im Untersuchungsgebiet einen kontinuierlichen Übergang von schnellen zu langsamen Schüttungsänderungen (Abb. 14). In der vorliegenden Untersuchung an Quellpegeln wird daher von einem System mit zwei Gruppen von Grundwasserumsatzräumen, die parallel geschaltet sind, ausgegangen. Die

Umsatzraumgruppe des langsam fließenden Grundwassers mit ihrem zeitlich langsamen Schüttungsrückgang wird Speicherraum und die Umsatzraumgruppe des schnell fließenden Grundwassers mit ihrem zeitlich raschen Schüttungsrückgang Drainageraum genannt. Jede der beiden Umsatzraumgruppen hat ihre eigene statistische Durchlässigkeitsverteilung. Der Übergang von der Durchlässigkeitsverteilung des Drainageraumes zu der des Speicherraumes ist mehr oder weniger unstetig. Dies belegen die scharfen Knickpunkte der Trockenwetterganglinien. Der Grund dafür ist geologischer Natur (siehe Kap. 4.2.2):

Karbonatgesteine werden abhängig von Fazies und Bankmächtigkeiten von Klüften unterschiedlicher Öffnungsweiten durchzogen. Der Verkarstungsgrad hängt vom Wasserdurchsatz und damit von der Durchlässigkeit des Gesteins ab, die wiederum von der Öffnungsweite der Klüfte beeinflusst ist. Daher geht die Verkarstung im Bereich weit geöffneter Klüfte schneller vonstatten als im Bereich von fast geschlossenen (BÖGLI 1978). Die ursprünglich weiten Klüfte erweitern sich durch Mischungskorrosion von selbst. Deswegen kann man wohl davon ausgehen, daß der Drainageraum den Klüften mit großen Öffnungsweiten, seien sie primär durch Dehnung oder sekundär durch Verkarstung bedingt, entspricht und daß der Speicherraum das restliche Trennfugeninventar und den Porenraum des Gesteins repräsentiert.

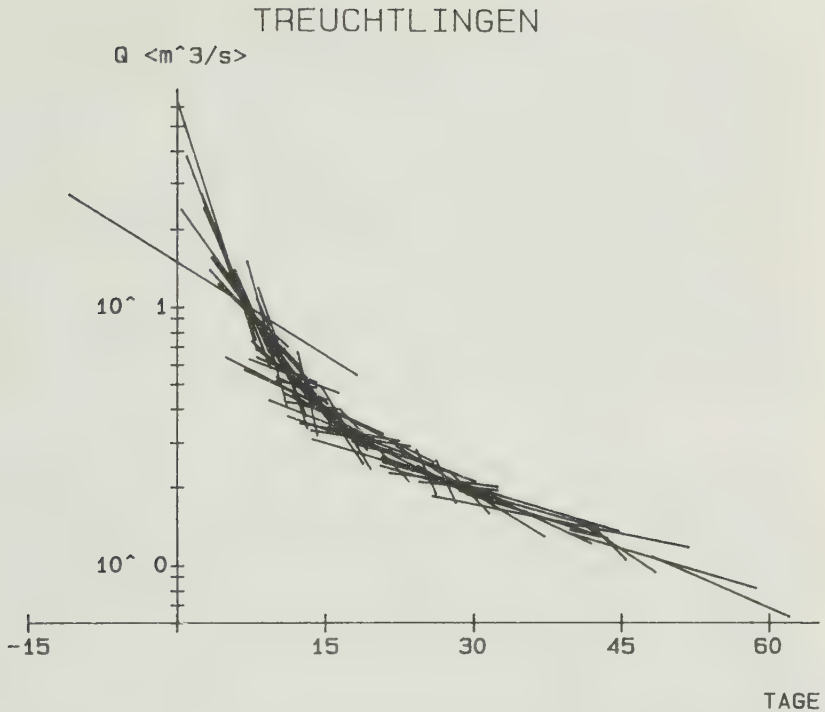


Abb. 14: best-fit-Berechnung für das Trockenwetterabfluß-geschehen am Pegel Treuchtlingen. $t = 0$ Tage für höchsten Schüttungswert festgelegt.

Der Speicherraum wird in der Modellvorstellung durch großes Volumen und kleine Austrittsöffnung, der Drainageraum durch kleines Volumen und große Austrittsöffnung gekennzeichnet (Abb. 10). Die in der best-fit-Kurve von der allgemeinen Steigung abweichenden Geraden spiegeln das oben erwähnte Auslaufverhalten für extreme Füllzustände von Speicher- und Drainageraum wider.

Prinzipiell wäre dem Speicherraum der flache Teil der Trockenwetterlinie ab dem Knickpunkt zuzuordnen. Ist der

Knickpunkt aber nicht sehr deutlich ausgeprägt, was selten der Fall ist, so kann dies zu einer schlechten Reproduzierbarkeit der Auswertung aufgrund eines zu großen Ermessensspielraumes bei der Festlegung des Knickpunktes führen. Deshalb wird vereinfacht und analog zu SCHOELLER (1965) bei der Trockenwetterabflußanalyse einer Quelle das jeweils flachste beobachtete Teilstück als repräsentativ für den Speicherraum angesehen. Ist der Knickpunkt relativ scharf ausgeprägt, so führt die hier vorgenommene Abgrenzung zu annähernd gleichen Aussagen, als ob der ganze Bereich ab dem Knickpunkt herangezogen werden würde. Ist der Knickpunkt unscharf, so hat diese Definition den Vorteil guter Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Die Trockenwetterlinie wird mit fortschreitendem Trockenwettergeschehen zwar immer flacher, aber die Trockenwetterperioden dauern im Untersuchungsgebiet nicht lange genug an, als daß der flachstmögliche Abschnitt der Trockenwetterlinie beobachtet werden könnte; denn dazu müßte die Ganglinie der Quelle bis zum Trockenfallen analysiert werden. Die den Speicherraum beschreibenden mittleren Verweilzeiten sind daher als untere Grenzwerte anzusehen.

Im Gegensatz zu SCHOELLER (1965) wird dem Drainageraum nicht nur der erste und steilste lineare Bereich zugeordnet, sondern alle Bereiche mit Ausnahme des flachsten werden zu einem Umsatzraum mit in erheblichem Umfang streuenden Kluftweiten zusammengefaßt. Für Trockenwetterganglinien mit scharfem Knickpunkt sind die Abweichungen zu SCHOELLER (1965) vernachlässigbar klein.

5.3 Ergebnisse

Sobald die TWL in den oben beschriebenen Abschnittsgruppen genau erfaßt ist, kann man durch sie folgendes berechnen (Abb. 15):

- Das effektive Hohlraumvolumen des Gesteins ($V_{\max}$). Es ergibt sich aus dem Integral über die $TWL_{\max}$ als maximal auslauffähiges Volumen (Abb. 15 b).
- Aus ihm und dem Volumen des entleerten Grundwasserkörpers (V_{Gestein}) kann man die effektive Porosität (n_e) des Grundwasserkörpers berechnen mit:

$$n_e = V_{\max} / V_{\text{Gestein}} \quad [-]$$

- Das Volumen des Speicherraumes (V_s) entspricht dem Integral unter der Geraden mit der geringsten Steigung in der $TWL_{\max}$ (Abb. 15 b).
- Die untere Grenze des Drainageraumvolumens (V_d) entspricht dem Integral unter der $TWL_{\min}$ abzüglich des darin enthaltenen Anteils an minimaler Schüttung aus dem Speicherraum (Abb. 15 a). #
- Das Volumen des Drainageraumes kann zur Kontrolle aber auch aus der Differenz von $V_{\max}$ und V_s eingeeengt werden (V_{ds}) (Abb. 15 b).

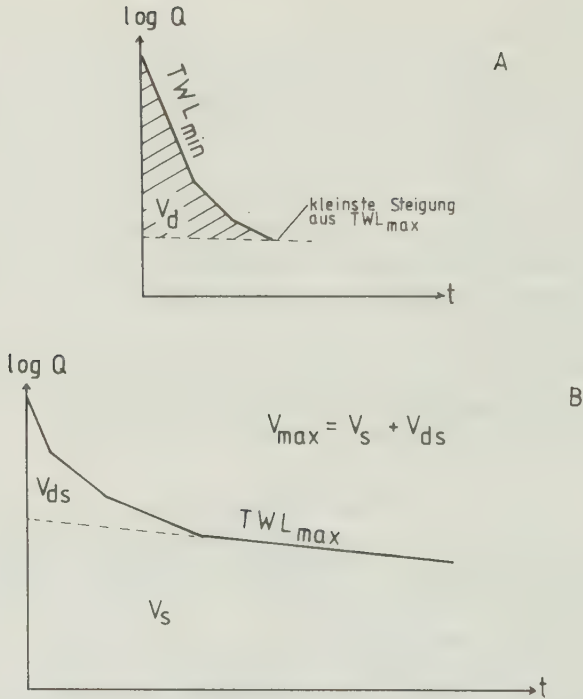


Abb. 15: Volumensberechnungen aus den Ergebnissen der Trockenwetterabflußanalyse:

A: Berechnung des Drainageraumvolumens (V_d)

B: Berechnung des Hohlraumvolumens des Gesteins (V_{max}), des Speicherraumvolumens (V_s) und die einengende Drainageraumvolumensberechnung (V_{ds}).

5.3.1 Anteil von Speicher- und Drainageraum am Gesamthohlraumvolumen

Das Drainageraumvolumen (V_{ds}) läßt sich aus dem Integral über die gesamte TWL abzüglich des Speicherraumes bestimmen:

$$V_{ds} = V_{max} - V_s \quad [m^3]$$

Ist die TWL_{min} für die untere Grenze des Abflußverhaltens des Klufttraumes und die kleinste Steigung der TWL_{max} für den Porenraum repräsentativ, so muß

$$V_{ds}/V_{max} \geq V_d/V_{max}$$

sein. Es zeigt sich, daß dies für die ausgewerteten Pegelaufzeichnungen im Untersuchungsgebiet in der Regel zutrifft:

Pegel	V_{ds}/V_{max} [%]	V_d/V_{max} [%]
Gläsbrunnen	15.5	0.9
Brunnhaupten	0.2	1.4
Ettling	2.1	0.5
Prunn	3.3	0.3
Aubrunnen	1.1	0.7
Gundlfing	5.4	1.7
Obereichstätt	16.6	2.4
Schafhausen	7.3	2.2
Mittelwert	6.4	1.3
Treuchtlingen	37.3	17.1
Berching	53.8	18.5

Der Anteil des Drainageraums am entwässerbaren Gesamthohlraumvolumen beträgt durchschnittlich nur ca. 1.3 Vol.%. Dies bedeutet aber nicht, daß der Drainageraum auch nur 1.3 % zur tatsächlichen Schüttung beiträgt.

Deutlich hebt sich hiervon die entsprechende Rechnung für die Flüsse Altmühl (Pegel Treuchtlingen) und Sulz (Pegel Berching) ab. Sie ergibt ca. 18 % für den rasch entwässernden Hohlraumanteil.

5.3.2 Der zeitlich veränderliche Beitrag aus Speicher- und Drainageraum zur Gesamtschüttung

Mit fortschreitender Zeit nimmt beim Trockenwetterabflußgeschehen der Anteil der Schüttung aus dem Speicherraum an der Gesamtschüttung zu. Er berechnet sich aus der best-fit-Kurve, die das häufigste Abflußverhalten beschreibt (siehe Kap. 8.5.7 und Abb. 16).

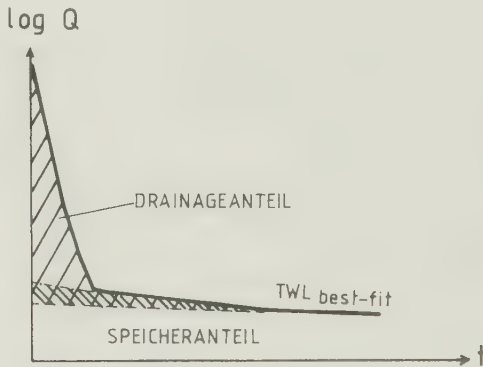


Abb. 16: Skizze der Berechnung von Speicherraumanteil und Drainageraumanteil am Abfluß.

Vergleicht man nun die einzelnen Quellen im Hinblick auf den Beitrag aus dem Speicherraum (Abb. 17), so zeigt sich folgendes:

- Die Quellen unterscheiden sich hauptsächlich in ihren Speicherraumanteilen. Hierbei tritt wiederum ein deutlicher regionaler Unterschied von Nord nach Süd auf: In den ersten Tagen des Trockenwetterabflusses liegt der Anteil der Schüttung aus dem Speicherraum bei den Quellen im nördlichen Untersuchungsgebiet bei ca. 20 %

(Linien 3,4,5,7 in Abb. 17), bei denen im südlichen Untersuchungsgebiet bei ca. 40 % (Linien 1,2 in Abb. 17). Deutlich heben sich davon die untersuchten zwei Flüsse (Linien 8,9 in Abb. 17) im Untersuchungsgebiet mit anfänglichen Speicherraumanteilen von ca. 5 % ab. Der Pegel Lenting am Lentinger Bach (Linie 6 in Abb. 17) erfaßt eine ganze Reihe von Quellen im Süden des Untersuchungsgebietes. Da die Quellen aber bis zu einigen Kilometern stromaufwärts liegen, macht sich ein nicht unerheblicher Direktabfluß bemerkbar. Deshalb zeigt der Lentinger Bach, obwohl die ihn speisenden Quellen im Süden des Untersuchungsgebietes liegen, ein Trockenwetterverhalten, das zwischen dem der Quellen im Süden und dem der Flüsse liegt.

- In den Quellen mit hohen Anfangswerten von ca. 40 % Speicherraumanteil konnte noch nie ein Markierungsstoffnachweis geführt werden, in denen mit anfänglich nur 20 % Speicherraumanteil war dagegen ein solcher Nachweis möglich.
- Die Kurven in Abb. 17 laufen alle mit Ausnahme der von den Oberflächengewässern ab ca. 15 Tagen mehr oder weniger parallel zueinander.

Daraus folgt:

- Da alle Quellen ab einem bestimmten Zeitpunkt das gleiche Auslaufverhalten zeigen, ist bei allen von da an das gleiche Reservoir in gleicher Weise anteilig wirksam. Die Entleerung des Speicherraumes wird mit fortdauerndem Trockenwettergeschehen immer maßgebender.
- Dieser Speicherraum ist homogen und muß bei allen analysierten Quelleinzugsgebieten mehr oder weniger die gleichen hydraulischen Eigenschaften haben.

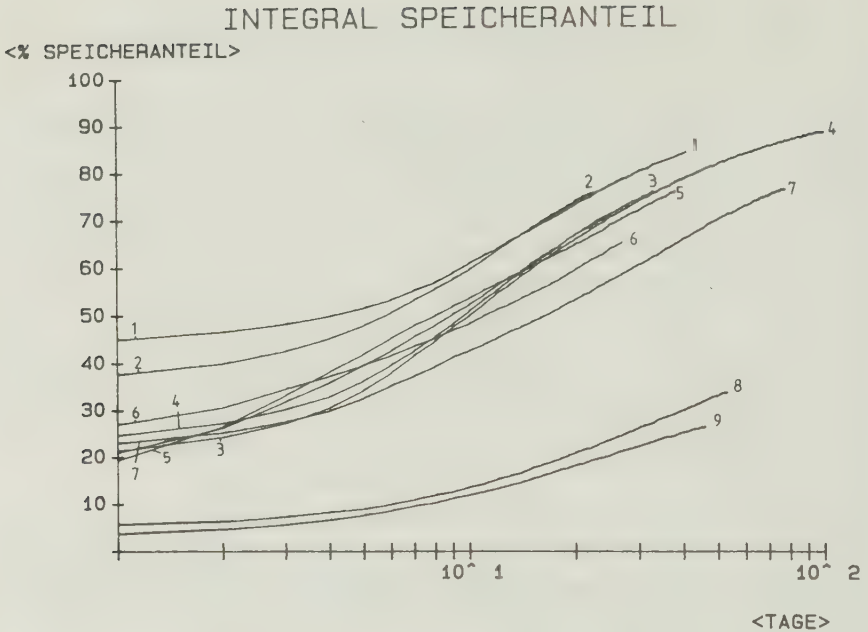


Abb. 17: Veränderlicher Integralanteil von Zufluß aus dem Speicherraum an der aufsummierten Gesamtschüttung mit fortschreitendem Trockenwettergeschehen. 1=Brunnhaupten, 2=Gläsbrunnen, 3=Prunn, 4=Schafhausen, 5=Aubrunnen, 6=Lenting, 7=Ober-eichstätt, 8=Treuchtlingen, 9=Berching.

- Geht man vom Trockenwetterabfluß nach 15 Tagen ab dem maximalen Schüttungswert aus, so liegt der integrale Anteil des Schüttungsvolumens aus dem Speicherraum bei ca. 60 %, d.h., der Drainageraum, der durchschnittlich 1.3 Vol.% des Hohlraumvolumens ausmacht, trägt bis zu diesem Zeitpunkt durchschnittlich 40 % zum tatsächlichen Wassertransport bei. Zu ähnlichen Drainageraumanteilen am Abflußgeschehen kommt SEILER (1968) für den Mittleren Buntsandstein im Saarland.

- Unterschiede im Schüttungsverhalten der einzelnen Quellen sind ausschließlich auf eine unterschiedliche Ausbildung und Wirksamkeit des Drainageraums zurückzuführen. Die Quellen mit einem großen Drainageraumeinfluß liegen alle im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Der Speicherraum aber ist für alle Quellen etwa gleichgeartet.

Einschränkend muß gesagt werden, daß die Anteilsberechnung auf den höchsten während des Untersuchungszeitraumes beobachteten Abfluß im Trockenwetterabflußgeschehen und damit auch auf den höchsten Füllstand des Karstgrundwasserkörpers bezogen wurde. Im Normalfall ist mit solchen Füllständen des Grundwasserkörpers nicht zu rechnen; denn einerseits fiel mit dem Frühjahr 1982 eine Periode extrem hoher Grundwasserstände in den Untersuchungszeitraum, andererseits setzt das Trockenwettergeschehen bei beliebigen Füllständen des Grundwasserkörpers und nicht immer beim maximalen Füllstand ein. Die Kurvenscharen verschieben sich also in der Regel nach oben, d.h. zu höheren Speicherraumanteilen. Eine weitere Einschränkung liegt darin, daß für eine statistische Auswertung, wie sie die vorliegende Auswertung anstrebt, umfangreiche Schüttungsdaten vorliegen müssen; denn nicht nur die Qualität, sondern auch die Quantität der Daten beeinflußt das Ergebnis entscheidend. Erfahrungsgemäß kann für eine Quelle erst ab ca. 50 einzelnen Trockenwetterabflüssen, die auch die ganze Schwankungsbreite der Quellschüttung abdecken müssen, von einer hinreichend stabilen Datenbasis ausgegangen werden. Diese Bedingung ist nicht bei allen ausgewerteten Quellpegeln erfüllt. Wenn diese hier aber trotzdem aufgeführt wurden, dann deswegen, weil sie immerhin einen Trend aufzeigen können. So sind einige der berechneten Zahlen wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Beobachtungszeit zwar qualitativ, aber nicht unbedingt auch quantitativ sehr zuverlässig. Diese Zahlen noch geringfügig zu verbessern, wird späteren Ausarbeitungen vorbehalten bleiben müssen.

5.3.3 Verweilzeiten

Der Exponentialkoeffizient a (in der Literatur auch mit α bezeichnet) in der Beziehung

$$Q(t) = Q_0 * e^{-at}$$

gibt die Auslaufcharakteristik eines Reservoirs wieder, wobei

$$1 / a = T \quad [d]$$

der mittleren Verweilzeit entspricht. Dies wird besonders deutlich, wenn man die Funktion $Q(t)$ in den Grenzen 0 bis unendlich integriert :

$$\int_0^{\infty} Q_0 * e^{-at} dt = \frac{Q_0}{a}$$

Pegel	$a \cdot 10^{-3} [1/d]$	Verweilzeit [d]
Gläsbrunnen	2.2	454
Brunnhaupten	2.1	476
Ettling	1.3	769
Pruun	0.8	1250
Aubrunnen	2.8	357
Gundlfing	4.9	204
Obereichstätt	2.8	357
Schafhausen	3.6	278
Treuchtlingen	12.3	81
Berching	11.7	85

Tab. 1: Mittlere Verweilzeiten des Grundwassers im Speicherraum des Karstes der Südlichen Frankenalb.

Während der größte und der kleinste a-Wert einer Quelle um 3 Größenordnungen auseinanderliegen, unterscheiden sich die kleinsten a-Werte aller Quellen untereinander (Tab. 1) nur unwesentlich.

Es muß allerdings bedacht werden, daß die Quellen nicht bis zu ihrem Trockenfallen beobachtet werden konnten und daher noch kleinere a-Werte existieren können. Auf alle Fälle kann man sagen, daß die mittleren Verweilzeiten des Speicherraums für die Karstquellen nach der Trockenwetterabflußanalyse in der Regel bei mindestens 1-2 Jahren liegen. Es bestätigt sich hier, was auch schon die Betrachtung der Schüttungsanteile zeigte, daß nämlich der Speicherraum für alle Quellen mehr oder weniger die gleichen hydraulischen Eigenschaften besitzt.

In der Literatur finden sich wegen einer abweichenden Interpretation und Auswertung der Trockenwetterabflüsse, anderer Grade der Verkarstung, anderer geologischer Randbedingungen für das Auslaufgeschehen aus dem Karst, anderer meteorologischer Gegebenheiten sowie einer unterschiedlich großen Datenbasis für andere Karstgebiete nur teilweise ähnliche Werte (Tab. 2):

Autor	$a \cdot 10^{-3}$ [1/d]	T [d]	Formation	Land
ATKINSON (1977)	27.0	37	Karbon	England
BURGER (1983)	12.0	83	Jura	Schweiz
KULLMAN (1983)	3.3	303	Trias	Tschechoslowakei
MIJATOVIC (1983)	11.4	87	Kreide	Jugoslawien
SCHOELLER (1965)	9.1	109	Jura	Schweiz

Tab. 2: Mittlere Verweilzeiten des Grundwassers im Speicherraum in anderen Karstgebieten.

Auch bei den Flußpegeln Treuchtlingen und Berching würde ein Reservoir mit gleich niedrigem a -Exponenten wie in den Karstquellen dominant werden, wenn die Trockenzeitperioden genügend lange andauern würden. Die beigeschalteten Reservoirs mit kürzeren mittleren Verweilzeiten sind, bzw. können hier noch nicht alle entleert sein, weil das Trockenwetterabflußgeschehen in unserem Klima nur zu kurze Zeit für das Entleerungsgeschehen dieser speziellen Reservoirs anhält: Vergleicht man einmal zur methodischen Kontrolle den Anteil des Drainagevolumens am Gesamthohlraumvolumen mit den beobachteten mittleren Verweilzeiten des Speicherraums (Abb. 18), so sieht man, daß die beobachtbaren mittleren Verweilzeiten größer werden, wenn der Anteil des Drainageraumvolumens am Gesamthohlraumvolumen abnimmt: Ist das Volumen des Drainageraumes verhältnismäßig groß, so können die Umsatzräume mit langsamer Fließbewegung bei der Dauer der durch unser Wettergeschehen vorgegebenen Trockenwetterperioden im Untersuchungszeitraum eben noch nicht beobachtet werden. Extrapoliert man die Ausgleichskurve zu kleineren Drainageraumanteilen hin, so wären vermutlich Verweilzeiten im Speicherraum von ca. 50 Jahren zu ermitteln.

5.3.4 Porosität des Karstes

Aus den Ergebnissen der Trockenwetterabflußanalyse kann auch die effektive Porosität (n_e) des Karstgrundwasserkörpers als Mittelwert rechnerisch eingegrenzt werden. Sie entspricht dem Verhältnis von maximal errechenbarem Abflußvolumen und maximal entwässerbarem Gesteinsvolumen (siehe Kap. 4.2). Nachdem die TWL nirgendwo bis zum Versiegen der Quelle erfaßt werden konnte, wurde auch der niedrigst mögliche a -Wert nicht faßbar, d.h., das maximal errechenbare Abflußvolumen dürfte sicher etwas kleiner als das maximal mögliche ausfallen. Folglich gibt diese Art der Berechnung untere Grenzwerte für die mittlere effektive Porosität des Gesteins an.

DRAINAGERAUMANTEIL <%>

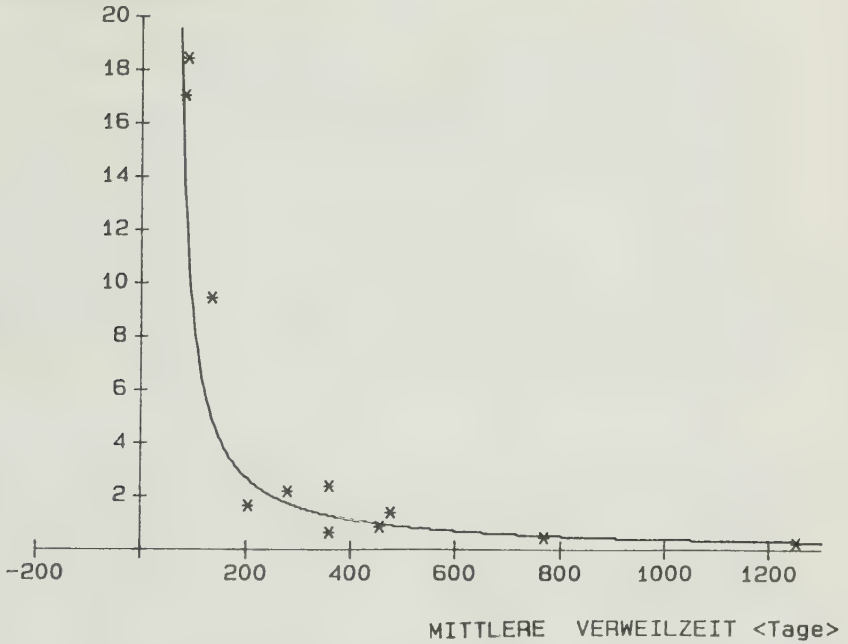


Abb. 18: Verhältnis von Drainageraumanteil am beobachtbaren Gesamthohlraumvolumen zu den mittleren Verweilzeiten im Speicherraum in der Südlichen Frankenalb.

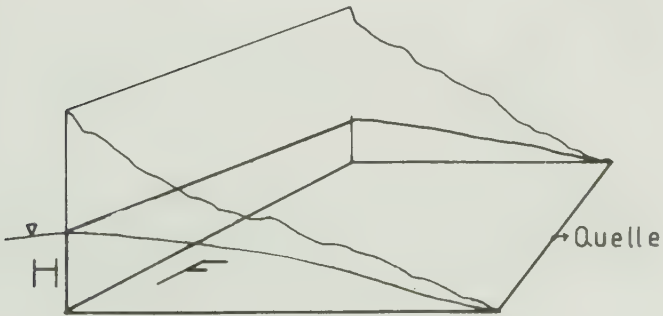


Abb. 19: Skizze Dreieck-Gesteinskeil zur Porositätsberechnung.

Für das entwässerbare Gesteinsvolumen wird ein Dreieckskeil (Abb. 19) angenommen mit der Grundwasserspiegeldifferenz von Quelhöhe und unterirdischer Bergwasserscheide als Höhe (H). Die Einzugsgebietsfläche (F) wurde aus dem MQ der Quelle und der Grundwasserneubildungsrate ermittelt (siehe Kap. 3.2). Das Volumen des Gesteins (V_G) errechnet sich mit:

$$V_G = F * H / 2 \quad [m^3]$$

Das maximal errechenbare Abflußvolumen (V_{max}) erhält man aus der TWL_{max} (siehe Kap. 8.5.6). Für die Einzugsgebiete der einzelnen Pegel ergeben sich dann die Porositäten in Tabelle 3:

Pegel	V_{max} [km ³]	V_G [km ³]	n_e [%]
Gläsbrunnen	0.005016	0.120	4.2
Brunnhaupten	0.004005	0.079	5.1
Ettling	0.014827	0.300	4.9
Prunn	0.050413	1.699	3.0
Aubrunnen	0.002199	0.319	0.7
Gundlfing	0.001040	0.237	0.4
Obereichstätt	0.032722	1.720	1.9
Schafhausen	0.000712	0.023	3.1
Mittelwert			2.7

Tab. 3: Effektive Porosität des Grundwasserkörpers im Karst der Südlichen Frankenalb.

Die aus der Trockenwetterabflußanalyse errechnete, durchschnittliche untere Grenze der effektiven Gesteinsporosität im Untersuchungsgebiet liegt bei 2.7 %. Ähnliche Werte wurden auch in anderen Karstgebieten ermittelt (Tab. 4) :

Autor	n_e [%]	Formation	Land
ATKINSON 1977	0.92	Karbon	England
PALOC & THIERY 1983	2	Jura	Frankreich
STRAYLE 1970	1.5 - 3.3	Jura	Deutschland
VILLINGER 1969	0.5	Jura	Deutschland
VILLINGER 1972	1 - 3	Jura	Deutschland
VILLINGER 1977	2	Jura	Deutschland
WEIDENBACH 1954	1.8	Jura	Deutschland

Tab. 4: Effektive Gesamtporositäten in anderen Karstgebieten.

Diese Methode der Berechnung der effektiven Porosität als Mittelwert für den Drainage- und Speicherraum erfordert ausreichend stabile statistische Ausgangsdaten. Davon kann im Untersuchungsgebiet wegen des teilweise sehr kurzen Beobachtungszeitraumes nicht immer ausgegangen werden. Auch die Berechnung des Gesteinsvolumens ist mit Fehlermöglichkeiten behaftet, da die genaue Form des Quelleinzugsgebietes und damit seine mittlere Grundwassermächtigkeit nicht immer hinreichend genau bekannt sind. Deshalb kann eine gesicherte Interpretation der Porositätswerte, insbesondere ihrer eventuellen regionalen Unterschiede und ihre Abhängigkeit vom unterschiedlichen Einfluß des Drainageraumes in den einzelnen Einzugsgebieten, noch nicht durchgeführt werden. Nachdem aber das Hohlraumvolumen des Drainageraumes nur 1.3 Vol.% am gesamten Hohlraumvolumen ausmacht, kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, daß die hier errechnete durchschnittliche effektive Porosität weitgehend der des Speicherraumes entspricht, wenn man nicht riesengroße Porositätswerte für den Drainageraum annimmt.

5.4 Zusammenfassung zur Trockenwetterabflußanalyse

Es werden zwei Grundwasserumsatzräume, der Speicher- und der Drainageraum, unterschieden.

Die lateralen Inhomogenitäten im Gestein sind so groß, daß die daraus resultierenden Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten die vertikalen Durchlässigkeitsunterschiede des Karstgrundwasserkörpers deutlich überlagern.

Der Volumensanteil des Drainageraumes am Gesamthohlraumvolumen beträgt durchschnittlich nur 1.3 Vol.%, der mittlere Schüttungsanteil aus dem Drainageraum hingegen ca. 40 %. Die mittleren Verweilzeiten im Speicherraum des Gesteinskörpers differieren kaum, d.h., der Speicherraum weist für alle Quellen eine ähnliche statistische Hohlraumverteilung und ähnliche hydraulische Parameter auf. Ein voneinander abweichendes Auslaufverhalten der einzelnen Quellen ist daher nur auf eine veränderte Ausbildung und eine unterschiedliche hydraulische Wirksamkeit des Drainageraumes zurückzuführen. Die aus der Trockenwetterabflußanalyse ermittelte, durchschnittliche effektive Gesamtporosität des Karstgrundwasserkörpers liegt bei 2.7 %. Dieser Wert dürfte sehr nahe an der effektiven Porosität des Speicherraumes liegen.

6. Vergleich von Trockenwetterabflußanalyse und Tritium-exponentialmodell

Zur Bestimmung der mittleren Verweilzeit eines Grundwassers kann der Tritiumgehalt im Quellwasser unter der Annahme einer exponentiellen Altersverteilung im Grundwasser herangezogen werden. Dabei können sich aber verschiedene Probleme ergeben:

- Aus der Eintragsfunktion rührt eine Mehrdeutigkeit bei der Interpretation des Tritiumgehaltes (SALVAMOSER 1982) her (Abb. 20),
- die Interpretation muß ein aus zwei Umsatzraumgruppen gemischtes Wasser berücksichtigen,
- die Bestimmung von sehr kurzen mittleren Verweilzeiten ist in der Regel nicht möglich.

Man kann nun nicht nur über das Tritium im Quellwasser, sondern auch über die Trockenwetterabflußanalyse Modellrechnungen für die Bestimmung der mittleren Verweilzeit des Grundwassers durchführen. Hierzu müssen aber bestimmte geologische Randbedingungen erfüllt sein (s.u.). Beide Berechnungsmethoden müssen zu gleichen Ergebnissen führen, wenn beide Verfahren die Wirklichkeit richtig beschreiben. D.h., es muß möglich sein, über die Trockenwetterabflußanalyse die zu erwartenden Tritiumgehalte im Grundwasser für einen geeigneten Beobachtungsort zu berechnen. Die so erhaltenen Modellgehalte für Tritium werden mit den im Untersuchungsgebiet gemessenen Tritiumgehalten der Quellwässer verglichen. Bei erfüllten Randbedingungen kontrollieren sich die isotopische und die hydrogeologische Berechnungsmethode gegenseitig.

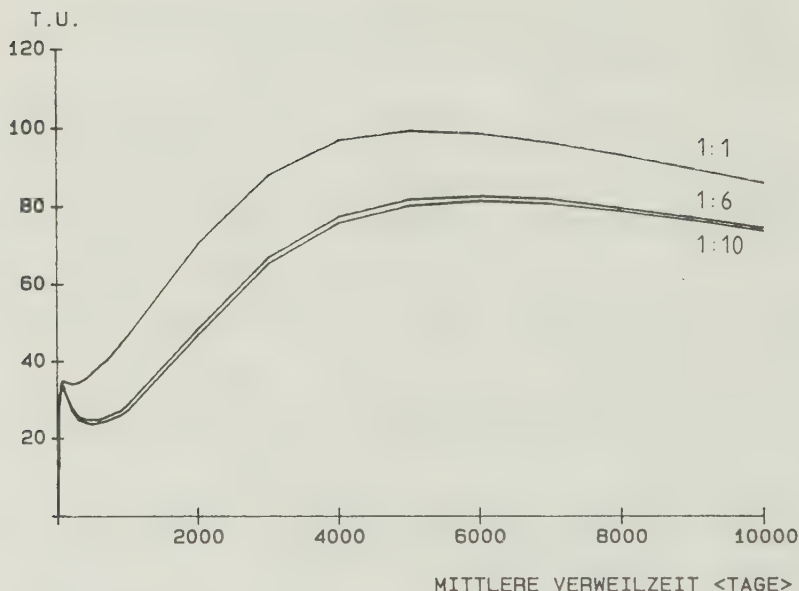


Abb. 20: Mit dem Exponentialmodell für Juli 1983 berechnete Tritiumgehalte für unterschiedliche mittlere Verweilzeiten und unterschiedliche Sommer/-Winter- Grundwasserneubildungsverhältnisse 1:1, 1:6, 1:10.

Bei der Interpretation von Tritiumgehalten wird die mittlere Verweilzeit (T) aus dem Tritiumgehalt (c_{out}) des Grundwassers am Beprobungspunkt, der Eintragsfunktion ($f(c_{in})$) in den Grundwasserkörper und der Zerfallskonstanten (λ) des Tritiums berechnet:

$$T = f(c_{out}), f(c_{in}), \lambda$$

Kennt man aus der Trockenwetterabflußanalyse die mittlere Verweilzeit und aus den Niederschlägen die Eintragsfunktion (Tab. 11), so kann man daraus den Tritiumgehalt einer Quelle berechnen:

$$c_{out} = f(T, f(c_{in}), 1)$$

Da es sich bei den Quellwässern um Mischwässer handelt, wird der Tritiumgehalt für Speicher- ($c_{S out}$) und Drainageraum ($c_{D out}$) getrennt berechnet mit den jeweiligen mittleren Verweilzeiten (T_S und T_D) unter der Annahme einer jeweils eigenständigen, exponentiellen Altersverteilung in jedem der beiden Karstgrundwasserumsatzräume. Weil sich der Anteil aus Speicher- und Drainageraum an der Schüttung mit fortschreitendem Trockenwettergeschehen ändert, muß der Speicheranteil (X_S) an der Schüttung zum Zeitpunkt der Probennahme berechnet werden. Der Tritiumgehalt (c_I) zum Zeitpunkt t_p für das Mischwasser errechnet sich aus:

$$c_I = (1-X_S) * c_{D out} + X_S * c_{S out} \quad [Konz]$$

mit:

$$c_{out}(t_p) = \sum_{t_q=0}^{t_q=t_R} c_{out}(t_p, t_q) \quad [Konz]$$

mit t_R = Zeitpunkt des letzten Niederschlags vor t_p
 t_q = Grundwasserneubildungszeitpunkt

Hierzu existieren folgende Randbedingungen:

- Das hier vorgestellte Mischungsmodell (siehe Kap. 8.4) geht von zwei weitgehend getrennten Umsatzräumen, die nebeneinander existieren und keinen nennenswerten wechselseitigen Grundwasseraustausch besitzen, aus.
- Die Mischung der Grundwässer aus den verschiedenen Umsatzräumen erfolgt, mathematisch betrachtet, erst im Quellauslauf. Wegen der sehr großen Unterschiede in den mittleren Verweilzeiten beider Umsatzräume ist die davor sicher stattfindende Mischung zwischen Wässern aus beiden Umsatzräumen in erster Näherung vernachlässigbar.

Pegel	Datum	gerechnet [T.U.]	gemessen [T.U.]	2 σ
Aubrunnen	30.10.79	33	20	+ 9
	27.01.81	30	32	$\mp$ 16
	23.06.82	24	27	$\mp$ 14
	14.09.82	20	20	$\mp$ 10
	19.07.83	18.5	18.5	$\mp$ 2.4
Gläsbrunnen	23.06.82	21	25	$\mp$ 13
	14.09.82	22	23	$\mp$ 15
	19.07.83	23	20.8	$\mp$ 1.6
Brunnhaupten	14.09.82	24	29	$\mp$ 10
	19.07.83	24.5	29.5	$\mp$ 3.0
Ettling	30.10.79	48	40	$\mp$ 15
	29.01.81	27	19	+ 13
	23.06.82	32	6	$\mp$ 10
	14.09.82	45	9	$\mp$ 9
	19.07.83	23	18.0	$\mp$ 1.5
Prunn	19.07.83	31.5	17	$\mp$ 12
Obereichstätt	19.07.83	38	70.5	+ 5.5
Schafhausen	19.07.83	38	72.4	$\mp$ 5.7

Tab. 5: Vergleich von mit Hilfe der Trockenwetterabflußanalyse gerechneten und in Quellen gemessenen Tritiumgehalten.

Als Eintragsfunktion werden bis 1970 die Monatsmittel der ^3H -Gehalte in den Niederschlägen von Wien, ab 1970 die des Hohenpeißenberg herangezogen (Tab. 11).

Wenn man von einer gleichmäßigen Grundwasserneubildung über das ganze Jahr ausgeht, so ergeben sich mit dem Exponentialmodell unrealistisch hohe Tritiumgehalte (Abb. 20 und Tab. 12). Auch bei den Ganglinien der Quellpegel ist zu beobachten, daß sich im Sommer nur Starkniederschläge in den Quellschüttungen auswirken. D.h., Niederschläge mit durchschnittlicher Ergiebigkeit dringen im Sommer zwar in den Boden ein, verdunsten danach aber wieder und tragen so nicht wesentlich zur Grundwasserneubildung bei. Hier ist also ein weiterer Umsatzraum - der Bodenraum - wirksam, der den beiden anderen Umsatzräumen - Speicher- und Drainageraum - vorgeschaltet ist. Deswegen wird in die Modellrechnungen ein Gewichtungsfaktor für die Sommer- und Wintergrundwasserneubildung von 1:6 (siehe Kap. 3.1) eingeführt. Die Unterschiede bei der Berechnung für einen Gewichtungsfaktor von 1:10 im Vergleich zu 1:6 (siehe Kap. 3.1) können in erster Näherung vernachlässigt werden (Abb. 20). Es wird, wie in Kapitel 3.1 ausgeführt, die Grundwasserneubildung im Winter 6 mal so hoch wie im Sommer angesetzt. Damit ergeben sich nach dem Exponentialmodell mit den aus der Trockenwetterabflußanalyse gewonnenen mittleren Verweilzeiten folgende Tritiumgehalte für einige ausgewählte Beprobungspunkte aus dem nördlichen (Obereichstätt, Prunn, Aubrunnen, Schafhausen) und südlichen (Gläsbrunnen, Brunnhaupten, Ettling) Untersuchungsgebiet (Tab. 5).

Die Ergebnisse zeigen dreierlei:

1. Gemessene Tritiumgehalte kleiner 15 T.U. (Ettling 23.06.82 und 14.09.82) können offensichtlich nicht berechnet werden. Die Rechenergebnisse liegen im Vergleich zu den gemessenen Tritiumwerten zu hoch. Dies liegt zum einen daran, daß das Trockenwetterabflußgeschehen unter den gegebenen Klimabedingungen nicht

lange genug andauert und die Quellen nicht bis zu ihrem Trockenfallen beobachtet werden konnten. Zum anderen ist aber auch zu bedenken, daß die Lage der Quelle relativ zur Basis des Grundwasserströmungsfeldes einen entscheidenden Einfluß auf die Vergleichbarkeit von gemessenen Tritiumgehalten und den Ergebnissen der Trockenwetterabflußanalyse hat: Ist die Quelle direkt über der unteren Berandung des Grundwasserströmungsfeldes gelegen (Abb. 21/2), so kann das Auslaufverhalten des ganzen Grundwasserkörpers analysiert werden. Handelt es sich jedoch um eine Quelle weit über der unteren Berandung des Grundwasserströmungsfeldes (Abb. 21/1), dann wird mit der Trockenwetterabflußanalyse nur das Auslaufverhalten des Grundwasservolumens über dem Quellniveau betrachtet. Der große Austausch- und Verweilraum zwischen Quellniveau und Grundwassersohlschicht wird nämlich durch die hier vorgelegte hydraulische Analyse nicht erfaßt. Aus den Tritiumgehalten hingegen erhält man in diesem Fall eine Information über das gesamte Grundwasserströmungsfeld. Diese Einschränkung gilt jedoch nur dann, wenn die Quellschüttung mengenmäßig stark von Grundwasser aus dem Grundwasserkörper unter dem Quellauslaufniveau beeinflusst ist. Dies ist vor allem nach sehr langen Trockenperioden der Fall.

2. Gemessene Tritiumgehalte über 70 T.U. (Obereichstätt, Schafhausen in Tab. 5) können ebenfalls nicht berechnet werden. Die Rechenergebnisse liegen zu niedrig. Ursache hierfür ist die zu ungenau bekannte Eintragsfunktion des Tritiums: Der Drainageraum hat, wie sowohl die Markierungen als auch die Trockenwetterabflußanalyse zeigen, eine mittlere Verweilzeit von einigen Tagen. Mit dem Exponentialmodell können aber wegen der geringen zeitlichen Auflösung der Eintragsfunktion des Tritiums - es liegen nur Monatsmittelwer-

te vor - nur mittlere Verweilzeiten von mehr als ca. 1 Jahr berechnet werden. Daher kann diese Eintragsfunktion des Tritiums weder für die Bestimmung kürzerer mittlerer Verweilzeiten als 1 Jahr noch für die Überprüfung der Trockenwetterabflußanalyse in diesem Bereich herangezogen werden.

3. Gemessene Tritiumgehalte von ca. 15-70 T.U. (bezogen auf 1983) können mit den aus der Trockenwetterabflußanalyse erhaltenen Verweilzeiten bestätigt werden, wenn man die Berechnung mit zwei gewichteten Exponentialverteilungen durchführt.

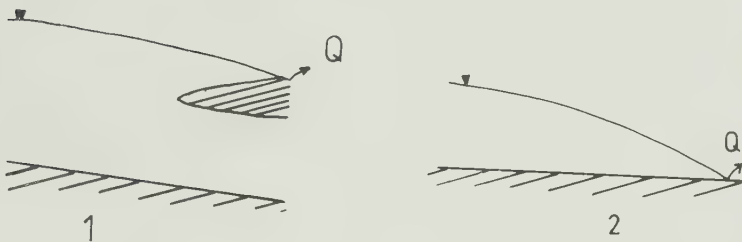


Abb. 21: (1) Quelle weit über der unteren Berandung des Grundwasserströmungsfeldes.
(2) Quelle direkt über der unteren Berandung des Grundwasserströmungsfeldes.

Die Trockenwetterabflußanalyse hat folgende Vorteile im Vergleich zur Methode der Interpretation von Tritiumgehalten im Grundwasser:

- Ohne Kenntnis irgendeiner Eintragsfunktion können mehrere Umsatzräume differenziert und quantifiziert werden, und infolgedessen läßt sich einem Grundwasserumsatzraum eine mittlere Verweilzeit eindeutig zuordnen.

- Es gibt keine Interpretationsschwierigkeiten von Tritiumgehalten aufgrund von Mehrdeutigkeiten.
- Es können auch sehr kurze mittlere Verweilzeiten berechnet werden.

Die Trockenwetterabflußanalyse bietet sich in gewissem Umfang als Ergänzung und Korrektiv für Interpretationsmodelle von Tritiumgehalten an. Sie kann diese, insbesondere bei Wässern mit großen mittleren Verweilzeiten und dort, wo die geologischen Randbedingungen ungünstig sind, aber nicht ersetzen. Vielmehr ist sie als eine methodische Erweiterung und Differenzierungsmöglichkeit anzusehen, die es erlaubt, auch heterogen aufgebaute Grundwasserkörper wie jenen im Karst realistisch betrachten zu können.

7. Zusammenfassung

Das Untersuchungsgebiet liegt im Malmkarst der Südlichen Frankenalb zwischen Anlauter, Altmühl und Donau.

Hydrogeologisch kann ein Karstgestein als Kluftgrundwasserleiter angesehen werden. Im Gegensatz zu wenig löslichen Gesteinen stellt sich durch die Verkarstung, d.h. durch die Erweiterung der Klüfte aufgrund von Lösungsprozessen, eine besonders große Streubreite der Kluftweiten ein. Das hat zur Folge, daß die im Karst ermittelten Grundwasserfließgeschwindigkeiten in erheblichem Umfang streuen. Für solche Grundwasserleiter ist die Angabe nur einer mittleren Verweilzeit zur Beschreibung des Grundwasserumsatzes problematisch.

Die Aufgabenstellung war nun, für diesen heterogenen Grundwasserkörper hydrogeologische Basisdaten im Hinblick auf eine spätere modellhafte Erfassung des Grundwasserumsatzes zu erarbeiten. Im einzelnen galt es,

- eine eingehende Kenntnis des Grundwasserströmungsfeldes und der unterirdischen Einzugsgebiete zu erlangen und zu ermitteln,
- wie verschiedene Grundwasserumsatzräume überhaupt differenziert werden können,
- wie sie geologisch lokalisiert werden können und wie stark faziesabhängig sie sind,
- wieviele Umsatzräume differenziert werden müssen, um das Grundwasserumsatzgeschehen hinreichend exakt beschreiben zu können, und

- welchen Anteil die einzelnen Umsatzräume am Grundwasserumsatzgeschehen haben, sowohl hinsichtlich des Austauschvolumens als auch hinsichtlich des Schüttungsanteils.

Hierzu wurden Karstwassermarkierungen durchgeführt und/oder interpretiert, Wasserbilanzen erstellt, die Inhaltsstoffe Tritium, Sauerstoff-18, Kalzium, Magnesium, die Grundwassertemperaturen und die elektrolytische Leitfähigkeit des Grundwassers untersucht und der Trockenwetterabfluß einzelner Quellen analysiert.

Bei den Karstwassermarkierungen zeigt sich, daß eine Markierung meist nur in einer Quelle nachgewiesen werden kann. Grund hierfür ist eine relativ scharfe Trennung der Einzugsgebiete der einzelnen Quellen. Diese hydraulischen Grenzen fallen mit geologischen Grenzen zusammen: Das Nebeneinander von Schicht- und Riffazies führte zu Sedimentwannen mit atektonischen Schichtverbiegungen zwischen den einzelnen Riffkomplexen und wirkt somit als Sammelstruktur für eindringende Sickerwässer.

Für die Sammelfähigkeit solcher Strukturen und die Eindringtiefe des Sickerwassers ins Grundwasser ist primär die Lage stauender Schichten (hier der Malm-Gamma-Mergel) relativ zum Vorflutniveau und zur Grundwasseroberfläche von Bedeutung. So sind im östlichen Anlauterabschnitt des Untersuchungsgebietes die Mergel des Malm Gamma zwar nur partiell stauend, aber die Geometrie des Grundwasserströmungsfeldes und die vorflutnahe Lage der Gammamergel erwecken den Anschein als seien sie komplett stauend. Dies zeigen auch Markierungsversuche, bei denen der Markierungsstoff die Gammamergel rasch durchfloß und Beobachtungen bei der Altmühlregulierung, durch die Quellschüttungen am Nordrand des Altmühltales beeinflusst wurden. Deshalb existieren im Anlauterabschnitt einerseits zwar

Grundwasserneubildungsbereiche, die fast ausschließlich über Quellen entwässern und die sich durch einen Reichtum an schüttungsstarken Quellen auszeichnen (z.B. im östlichen Anlauterabschnitt). Andererseits gibt es auch Grundwasserneubildungsbereiche, die hauptsächlich direkt in die Talfüllung der Altmühl entwässern (z.B. im Talabschnitt zwischen Pappenheim und Dollnstein) und die durch das Fehlen schüttungsstarker Quellen gekennzeichnet sind. Im Donaugebiet, wo die Gammamergel weit unter Vorflutniveau liegen, fließen zwei Drittel der versickerungsfähigen Niederschläge direkt der Talfüllung der Donau zu.

Im Anlauterabschnitt werden Verunreinigungen im Grundwasser oft über die Gammamergel von den Quellen abgeschöpft. Bei zu starker Grundwasserentnahme und Veränderung des Grundwasserströmungsfeldes könnten die Gammamergel diese Schutzfunktion für tiefere Bereiche des Grundwassers nicht mehr ausüben.

Die Inhaltsstoffe des Grundwassers zeigen eine signifikante räumliche Verteilung mit überwiegend hohen Tritiumgehalten und elektrolytischen Leitfähigkeiten im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes und niedrigen im südlichen Teil und in den Riffbereichen. Hierin drückt sich ein unterschiedlicher Einfluß einzelner Grundwasserumsatzräume aus. In der Riffazies und im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes dominieren Umsatzräume mit langsamer Fließbewegung. Je geringer der Einfluß der Umsatzräume mit schneller Fließbewegung ist, desto träger und gedämpfter reagieren die Quellen auf die variablen Stoffeinträge aus den Niederschlägen. Dies ist auch einer der Hauptgründe dafür, daß im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes und in der Riffazies durchgeführte Markierungsversuche in der Regel keinen Markierungsstoffnachweis in Quellen oder Brunnen erbrachten. Der regional unterschiedliche Einfluß von Grundwasserumsatzräumen mit schneller bzw. langsamer Fließbewegung ist nicht nur auf die unterschiedliche fazielle Ausbildung der Gesteine zurückzuführen, sondern

auch auf die unterschiedliche hydraulische Wirksamkeit der einzelnen Umsatzräume; so sind große Teile im Süden des Untersuchungsgebietes durch eine tertiäre Überdeckung plombiert, wodurch auch vorhandene, potentiell leistungsfähige Fließwege hydraulisch nicht wirksam werden können.

Wegen des größeren Einflusses der Umsatzräume mit schneller Fließbewegung im Norden des Untersuchungsgebietes ist dort der Verkarstungsprozeß stärker als im Süden.

Alle Untersuchungsergebnisse weisen qualitativ auf den Einfluß hydraulisch verschiedener Grundwasserumsatzräume hin. Um die Einflüsse der einzelnen Umsatzräume zu quantifizieren, wurde der Trockenwetterabfluß von Quellen analysiert. Da das Auslaufverhalten des Grundwasserkörpers abhängig von seinem Füllstand ist, wurde keine statische, sondern eine dynamische Analyse durchgeführt, d.h., es wurde nicht nur eine Trockenwetterganglinie, sondern eine für geringsten, häufigsten und maximalen Füllstand errechnet und der Einfluß der einzelnen Umsatzräume nicht als konstant, sondern als variabel mit fortschreitendem Trockenwettergeschehen angesehen.

Die Trockenwetterabflußanalyse zeigt, daß durch eine Differenzierung von zwei Gruppen an Umsatzräumen der Karstgrundwasserumsatz hinreichend genau beschrieben werden kann. Die Umsatzraumgruppe mit schneller Fließbewegung wird Drainageraum und die mit langsamer Fließbewegung Speicherraum genannt. Der Drainageraum entspricht geologisch dem verkarsteten Kluftsystem, während der Speicherraum das restliche Trennfugeninventar und das Porensystem repräsentiert.

Der Volumensanteil des Drainageraumes am entwässerbaren Gesamthohlraumvolumen beträgt im Durchschnitt der analysierten Quellen 1.3 Vol.%, der Schüttungsanteil aus ihm im Mittel hingegen ca. 40 %. Die Schüttungs- und Volumensanteile von Speicher- und Drainageraum sind abhängig vom Füllstand des Grundwasserkörpers, somit zeitlich variabel, und wurden daher als Funktionen des Füllstandes und der Dauer des Trockenwettergeschehens erfaßt. Der Speicherraum ist homogen und besitzt für alle analysierten Quelleinzugsgebiete mehr oder weniger die gleichen hydraulischen Eigenschaften. Unterschiede im Schüttungsverhalten der einzelnen Quellen sind somit allein auf eine unterschiedliche Ausbildung und Wirksamkeit des Drainageraumes zurückzuführen. Die aus der Trockenwetterabflußanalyse errechneten mittleren Verweilzeiten des Karstgrundwassers im Speicherraum liegen bei ca. 1 - 2 Jahren, die effektive Gesamtporosität liegt bei durchschnittlich 2.7 %.

Für den Karstgrundwasserkörper der Südlichen Frankenalb wird so aufgezeigt, daß zur vertikalen Gliederung des Grundwasserkörpers nach APEL (1971) laterale Inhomogenitäten hinzutreten.

Aus der Trockenwetterabflußanalyse ergeben sich mittlere Verweilzeiten des Karstgrundwassers, aus denen unter Einschluß einer Gewichtung des Ausflußgeschehens aus dem Speicher- und Drainageraum Tritiumkonzentrationen in den Quellwässern für einzelne Zeitpunkte berechnet werden. Diese Ergebnisse werden mit den gemessenen Tritiumwerten verglichen. Dieser Vergleich bringt unter bestimmten geologischen und klimatischen Randbedingungen übereinstimmende Werte. Bei mittleren Verweilzeiten unter einem Jahr ist die Tritiumeintragsfunktion im allgemeinen zu wenig genau bekannt, um aus Tritiumkonzentrationen verlässliche mittlere Verweilzeiten errechnen zu können. Hier ist die Aussage über mittlere Verweilzeiten aus dem Trockenwetterabfluß sicher zuverlässiger als jene aus den Tritiumwerten. Bei sehr hohen mittleren Verweilzeiten des Grundwassers erbringt die Berechnung der mittleren Verweilzeit nach

der Trockenwetterabflußanalyse dort unzuverlässige Werte, wo das Auslaufniveau der beprobten Quelle weit über der Grundwassersohlschicht liegt. In diesem Fall kann die mittlere Verweilzeit aus Tritiummessungen nach einem einfachen Exponentialmodell errechnet werden. In allen anderen Fällen sollte für die Beschreibung des Grundwasserumsatzes im Untersuchungsgebiet mit zwei gewichteten Verteilungsfunktionen, einer für den Speicher- und einer für den Drainageraum gerechnet werden.

8. Methodik

8.1 Abflußmessungen

Die Abflußmessungen wurden mit einem Meßflügel vorgenommen. Nur die Schüttung in sehr kleinen Gerinnen wurde mit einem Meßeimer ausgelitert, sofern eine Flügelmessung aufgrund der Gerinnegeometrie nicht möglich war. Für Flügelmessungen wurde die Abflußmenge (Q) aus den einzelnen Meßpunkten (i), der für die Meßpunkte berechneten Querschnittsfläche (F_i) und der Schaufelkonstanten (a) aus den gemessenen Umdrehungen (n) des Flügels pro Zeiteinheit (t) und einer Anlaufkonstanten (y) folgendermaßen ermittelt:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{n_i \cdot a \cdot F_i}{t} + y \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Im allgemeinen ergeben sich mit dieser Methode relativ kleine Fehler (DOLEISCH 1975).

8.2 Pegel

8.2.1 Pegelaufzeichnungen

Zum Einsatz kamen Horizontal- sowie Vertikalschreibpegel. Die Vertikalschreibpegel wurden mit Monatsumlauf (Vorschub 0.5 mm/h), die Horizontalschreibpegel mit einem Vorschub von 2 mm/h betrieben. Die Höhenübersetzung wurde wegen der im allgemeinen geringen Wasserstandsschwankungen und der erforderlichen hohen Auflösung für die Auswertung des Trockenwetterabflusses möglichst klein gewählt, meist 1:1 oder 1:2, und nur ausnahmsweise mit 1:5. Es zeigte sich, daß die Aufzeichnungen der Horizontalschreibpegel wegen ihrer hohen Zeit- und

geringen Wasserstandsauflösung für das zu bearbeitende Thema, insbesondere die Trockenwetterabflußanalyse, nicht so günstig waren.

Als Meßgerinne standen prinzipiell nur die vorhandenen Bachgerinne zur Verfügung, deren Abflußverhalten durch Einbau von Überläufen und Natursteinen leicht verbessert wurde, um günstig verlaufende und zeitlich konstante Abflußkurven zu erhalten und um dem Einfluß der im Untersuchungsgebiet sehr starken Verkrautung der Gerinne zu entgegenzuarbeiten. Dankenswerterweise standen auch 2 betonierte Meßgerinne vom Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt zur Verfügung. Die Abflußkurven für die einzelnen Meßstellen wurden in der Regel aus je ca. 30-40 Werten erstellt und von Hand eingepaßt.

8.2.2 Pegelauswertungen

Die Pegelaufzeichnungen wurden mit einem Digitizer in den Rechner eingegeben und abgespeichert. Zur Umrechnung der Wasserstandshöhen in Schüttungsmengen wurden Stützpunkte der Abflußkurve eingegeben und eine Splinefunktion einbeschrieben (BÖHMER 1974). Diese diente dann als Umrechnungsfunktion. Aus den Schüttungseinzelwerten (ca. 20/Tag) wurden Tagesmittelerwerte errechnet. Nur durch dieses automatisierte Verfahren war die Auswertung von 16 betriebenen Pegeln, die zusammen bis zu 500 000 digitalisierte Einzelwerte/Jahr lieferten, überhaupt möglich.

8.3. Hammerschlagrefraktionsseismik

Die Hammerschlagseismik ermöglichte es, die Mächtigkeit der Talfüllungen bis zur Felsobergrenze zu ermitteln. Zur Verwendung kam ein Seismograph der Fa. Bison, Modell 1570 C.

Voraussetzung für die Anwendung dieser Refraktionsseismik ist es, daß die seismischen Geschwindigkeiten einer Schichtenfolge mit zunehmender Tiefenlage konstant bleiben oder ansteigen. Dies ist in den Talfüllungen des Untersuchungsgebietes meist der Fall. Schwierigkeiten bereiten, insbesondere was die Signalschärfe anbelangt, tonige Einschaltungen und die Auelehme an der Geländeoberfläche.

Im Gelände wird die Laufzeit (Z) des ersten Einsatzes der Kompressionswelle für die Entfernung (X) zwischen Anregungspunkt und Geophon bestimmt. Daraus errechnet sich die seismische Geschwindigkeit (v_s) mit :

$$v_s = X / Z \quad [m/s]$$

Die Geschwindigkeit ist eine tatsächliche im Falle einer horizontalen und eine scheinbare im Falle einer geneigten Refraktionsfläche (BENTZ 1961). Die Laufzeit für eine von einer horizontalen Schicht refraktierten Welle errechnet sich aus (Abb. 22):

$$Z = LA/v_1 + LB/v_2 + LC/v_1 \quad [s]$$

Im Falle einer horizontalen Refraktionsfläche wird $DA = DC = D$ und damit :

$$\begin{aligned} LA &= LC = D / \cos r \\ LB &= X - 2 \cdot D \cdot \tan r \end{aligned}$$

Wegen des teilweise sehr unruhigen Reliefs der Felsoberfläche unter der Talfüllung im Untersuchungsgebiet mußte die Tiefenlage der Felsoberfläche für den geneigten Fall berechnet werden. Dazu wurden Vor- und Rückprofile geschlagen.

Die Mächtigkeit (D) der Schicht n unter Punkt A ist (MOONEY 1980):

$$D_n = \frac{v_n}{\cos u_n + \cos v_n} \left[\text{INT}_{n+1} * \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{D_i}{v_i} (\cos u_i + \cos v_i) \right] \quad [\text{m}]$$

mit v_i = wahre seismische Geschwindigkeit von Schicht i
 INT = Intercept der Laufzeitgeraden von Schicht i

8.4 Exponentialmodell für Tritiumeintrag

Der in den Quellwässern gemessene Tritiumgehalt rührt hier ausschließlich vom Eintrag von Tritium aus der Atmosphäre ins Grundwasser her. Da es sich um einen flächigen Eintrag handelt und die Fließgeschwindigkeiten im Grundwasserkörper wegen der begrenzten Verkarstung und der Geometrie des Grundwasserströmungsfeldes zur Tiefe hin abnehmen, wurde eine exponentielle Altersverteilung im Grundwasser angenommen.

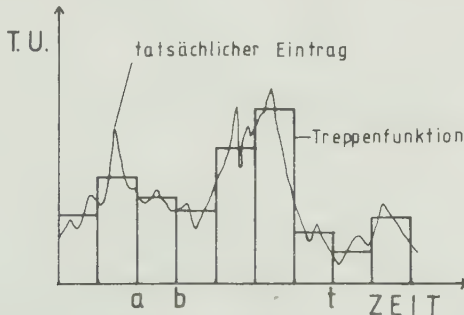


Abb. 23: Skizze: kontinuierlicher, tatsächlicher Eintrag und Treppenfunktion für Tritiumeintrag.

Für einen einzelnen Eintragszeitabschnitt (a,b) gilt:

$$c_{out}(t,a,b) = \int_{t-b}^{t-a} c_{in}(t-t_q) * e^{-lt_q} * \frac{1}{T} * e^{-\frac{t_q}{T}} dt_q \text{ [Konz]}$$

mit t = Zeitpunkt der Probennahme

t_q = t - Grundwasserneubildungszeitpunkt

l = Zerfallskonstante für Tritium

T = mittlere Verweilzeit im Grundwasserumsatzraum

Aus rechnerischen Gründen und der nicht hinreichend genau bekannten Eintragsfunktion des Tritiums mit den Niederschlägen wurde als Eintragsfunktion eine Rechteckfunktion (Abb. 23) angenommen mit:

$$c_{in}(x) = k \quad \text{für } a < b$$

Daher gilt :

$$c_{out}(t,a,b) = \frac{k}{T} \int_{t-b}^{t-a} e^{-tq(1+\frac{1}{T})} dt_q \quad \text{[Konz]}$$

$$= \frac{-k}{1T+1} \left[e^{-(t-a)\frac{1T+1}{T}} - e^{-(t-b)\frac{1T+1}{T}} \right]$$

Für die einzelnen Monatsmittel (t_x) wurden die Grenzen (a,b) berechnet mit :

$$a = (t_{x-1} + t_x) / 2 \quad [t]$$

$$b = (t_{x+1} + t_x) / 2 \quad [t]$$

Die Austragskonzentrationen $c_{out}(t_p)$ zum Zeitpunkt t_p für eine bestimmte mittlere Verweilzeit T des Reservoirs errechnet sich aus der Summe aller Austragskonzentrationen der Einzelintervalle $c_{out}(t, q)$:

$$c_{out}(t_p) = \sum_{q=0}^{q=t_R} c_{out}(t_p, q) \quad [\text{Konz}]$$

mit t_R = Zeitpunkt des letzten Niederschlags vor t_p .

Für kleine $t_p - b$ muß auch die Intervallbreite $b - a$ klein sein, um eine genaue Aussage zu bekommen. Sind, wie im vorliegenden Fall, nur Monatsmittelwerte bekannt, können kurze mittlere Verweilzeiten schon aus methodischen Gründen nicht berechnet werden. Als Eintragsfunktion wurden bis 1970 die Monatsmittel von Wien, ab 1970 die des Hohenpeißenberg herangezogen.

Zur Berücksichtigung der jahreszeitlich unterschiedlich starken Grundwasserneubildung wurde das Eintragszeitintervall, nicht aber die Eintragskonzentration reduziert:

Fällt das Intervall $b - a$ in einen Zeitraum um den Faktor n reduzierter Grundwasserneubildung (siehe Kap. 3.1), so wurde ein Eintrag der Konzentration $c_{in}(a, b)$ über einen um den Faktor n verkürzten Zeitraum angenommen :

$$b_{\text{reduz.}} = a + (b - a)/n \quad [-]$$

8.5 Trockenwetterabflußanalyse

8.5.1 Grundvorstellung

Bei allen Betrachtungen zum Auslaufverhalten von Reservoiren wird im einfachsten Fall von einem linearen Auslaufverhalten ausgegangen:

$$V(t) = T * Q(t) \quad [\text{m}^3]$$

mit: $V(t)$ = Reservoirvolumen zur Zeit t

$Q(t)$ = Auslaufmenge zur Zeit t

T = mittlere Verweilzeit des Reservoirs

Unter der Annahme der Kontinuitätsbedingung

$$Q(t) = -dV(t)/dt \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

wird

$$\begin{aligned} Q(t) &= -T * dQ/dt \\ &= Q_0 * e^{-t/T} \end{aligned}$$

mit: Q_0 = Anfangschüttung zur Zeit t_0 .

Das Füllvolumen dieses Reservoirs zur Zeit t_0 ist demnach

$$\begin{aligned} V &= \int_0^{\infty} Q_0 * e^{-\frac{t}{T}} dt \quad [\text{m}^3] \\ &= Q_0 * T \end{aligned}$$

In der hydrogeologischen Praxis wird in der Regel jedoch nicht mit der mittleren Verweilzeit, sondern ihrem reziproken Wert a gerechnet. Zur Vereinfachung der darzustellenden Gleichungen wird $1/T = a$ verwendet.

8.5.2 Abschnittsweise definierte Trockenwetterganglinie (TWL)

Es wird unterstellt, daß der Trockenwetterabfluß im Karst aus einem System verschiedener Reservoirs stammt und sich als eine superponierte Funktion der Auslauffunktionen der einzelnen Reservoirs beschreiben läßt. Die Auslauffunktionen der einzelnen Reservoirs sollen sich jedoch so stark voneinander unterscheiden, daß die superponierte Auslauffunktion abschnittsweise durch eine jeweilige mittlere Verweilzeit definiert werden kann. Es ist dann jeder durch eine einfache Exponentialfunktion beschreibbare Teilabschnitt im zeitlichen Auslaufgeschehen einem Reservoir zuzuordnen.

Für die Auswertung werden die Momentanschüttungen des Trockenwetterabflusses einer Quelle halblogarithmisch gegen die Zeit aufgetragen. Es zeigt sich, daß meist mehrere lineare Bereiche auftreten. Die TWL wird in diese linearen Bereiche unterteilt, die im folgenden Teilstück genannt werden. Jedes Teilstück ist definiert durch Startwert (Q_1), Endwert (Q_2) und Steigung (b) der halblogarithmischen Geraden. Diese Zerlegung in Teilstücke wird für alle Trockenwetterabflüsse durchgeführt; danach werden die Teilstücke nach ihrem Q_1 fallend sortiert.

8.5.3 TWL des maximalen Füllstandes ($TWL_{\max}$)

Ziel ist die Beschreibung des Abflußverhaltens bei maximal gefülltem Grundwasserkörper.

Vorgehen:

Man nimmt das erste Teilstück (mit dem größten Q_1) und zeichnet mit seiner zugehörigen Steigung, bis das nächste Teilstück, zeitparallel verschoben, mit seinem Q_1 anschließt. Von diesem Q_1 zeichnet man wiederum mit der diesem Teilstück zugehörigen Steigung, bis das Teilstück

mit dem nächstkleineren Q1, zeitparallel verschoben, anschließt usw.. D.h., man versucht so lang wie möglich bei größtmöglichen Schüttungen zu bleiben.

Ergebnis:

Der Gültigkeitsbereich für das jeweilige Schüttungs-Steigungsverhältnis wird nach rechts, d.h. zu kleineren Schüttungen hin, erweitert. Ergebnis ist eine TWL beim maximal während des Beobachtungszeitraumes vorkommenden Füllstand. Es kann unter Umständen auch noch höhere Füllstände des Karstgrundwasserkörpers geben als die, die im Untersuchungszeitraum auftraten. Die daraus resultierende Kurve wird dann eher über, nie aber unter der bisherigen liegen. Die $TWL_{\max}$ gibt somit die untere Grenze der maximal möglichen Ausflußmenge aus dem Gestein an. Ein solcher maximaler Füllstand, wie er statistisch gesehen nur alle paar Jahrzehnte vorkommt, trat im Untersuchungsgebiet im Jahr 1981/1982 auf. Er konnte in einigen Pegel- auswertungen erfaßt werden.

8.5.4 TWL des minimalen Füllstandes ($TWL_{\min}$)

Ziel ist die Beschreibung des Abflußverhaltens bei minimal gefülltem Grundwasserkörper.

Vorgehen:

Man nimmt die steilste Steigung aller Teilstücke und zeichnet vom höchsten beobachteten Q1 bis zu dem zur steilsten Steigung zugehörigen Q2 und ab da mit der nächst steileren Steigung bis zum zugehörigen Q2 usw., d.h, man versucht so schnell wie möglich zum kleinsten beobachteten Schüttungswert zu kommen.

Ergebnis:

Der Gültigkeitsbereich für das Schüttungs-Steigungsverhältnis wird also nach links, d.h. zu größeren Schüttungen hin, erweitert. Man erhält die graphische Darstellung

des schnellstmöglichen Ausflusses aus dem Gestein. Für längere Beobachtungszeiträume kann die daraus ermittelte Kurve nur unter, nie aber über der bisherigen liegen. Die Kurve gibt somit die obere Grenze des schnellstmöglichen Ausflußverhaltens an.

8.5.5 best-fit - Kurve

Ziel ist die Beschreibung des im Beobachtungszeitraumes häufigsten, wahrscheinlichsten Abflußverhaltens.

Hierzu wurde ein best-fit für die Gesamtheit der einzelnen einfachlogarithmischen Teilstücke berechnet, indem die Überlappungsflächen (Abb. 24) minimiert wurden:

$$[F1 + F2]' = 0.$$

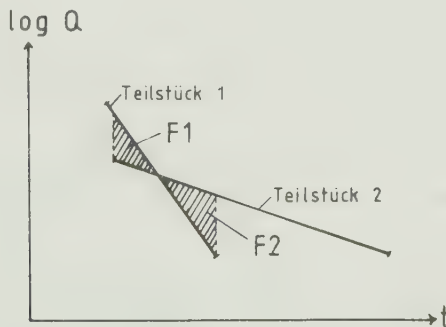


Abb. 24: Überlappung der Teilstücke und zu minimierende Flächen $F1$ und $F2$ für die Erstellung der best-fit-Kurve.

8.5.6 Volumensberechnungen

Das maximal mögliche Ausflußvolumen ($V_{\max}$) aus dem Gestein errechnet sich aus der $TWL_{\max}$ mit (Abb. 15):

$$V_{\max} = \int_0^{P1} Q_1 e^{-a_1 t} dt + \int_{P1}^{P2} Q_2 e^{-a_2 t} dt + \dots + \int_{Pn}^{\infty} Q_n e^{-a_n t} dt \quad [m^3]$$

Das minimal mögliche Abflußvolumen errechnet sich analog aus der $TWL_{\min}$. Bei beiden Berechnungsmethoden wird unterstellt, daß es keine kleineren a -Werte als die ermittelten gibt. Dies ist sicher nicht ganz zutreffend und man erhält deswegen auch eher zu kleine als zu große Ausflußmengen.

Das Wasservolumen des Umsatzraumes mit der größten ermittelten mittleren Verweilzeit (= kleinstes a) (V_S) errechnet sich aus der $TWL_{\max}$ (Abb. 15) mit:

$$V_S = \int_0^{\infty} Q_{n0} e^{-a_n t} dt \quad [m^3]$$

(Siehe dazu auch ATKINSON 1977). Es wird mit dem maximalen Grundwasservolumen im Speicherraum gleichgesetzt.

Das minimale Volumen des Drainageraumes (V_D) entspricht der Fläche unter der $TWL_{\min}$ abzüglich des darin enthaltenen Mengenanteils aus dem Speicherraum (Abb. 15):

$$V_D = \int_0^{P1} Q_1 e^{-a_1 t} dt + \int_{P1}^{P2} Q_2 e^{-a_2 t} dt + \dots$$

$$\dots + \int_{p_{n-1}}^{p_n} Q_n e^{-a_n t} dt - \int_0^{p_n} Q_{n0} e^{-a_n t} dt \quad [m^3]$$

8.5.7 Schüttungsanteil aus Speicher- und Drainageraum an der Gesamtschüttung

Die integrale Schüttung (Q_I) ab dem höchsten Q_1 bis zum Zeitpunkt tp_n berechnet sich aus der best-fit-Kurve mit:

$$Q_I = \left(\sum_{i=1}^{i=tp_n} \int_{tp_i}^{tp_{i+1}} Q_i e^{-a_i t} dt \right) \quad [m^3]$$

Davon ist der integrale Anteil aus dem Speicherraum (Q_{IS}):

$$Q_{IS} = \int_0^{tp_n} Q_{n0} e^{-a_n t} dt \quad [m^3]$$

Der integrale Beitrag des Drainageraumes (Q_{ID}) zur tatsächlichen Schüttung bis zum Zeitpunkt tp_n berechnet sich damit zu

$$Q_{ID} = Q_I - Q_{IS}$$

aus der best-fit- Kurve mit :

$$Q_D = \left(\sum_{i=1}^{i=tp_n} \int_{tp_i}^{tp_{i+1}} Q_i e^{-a_i t} dt \right) - \int_0^{tp_n} Q_{n0} e^{-a_n t} dt \quad [m^3]$$

ANHANG

Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1: Mittlere Verweilzeiten des Grundwassers im Speicher-
raum des Karstes der Südlichen Frankenalb.
- Tab. 2: Mittlere Verweilzeiten des Grundwassers im Speicher-
raum in anderen Karstgebieten.
- Tab. 3: Effektive Porosität des Grundwasserkörpers im Karst
der Südlichen Frankenalb.
- Tab. 4: Effektive Gesamtporositäten in anderen Karstgebieten.
- Tab. 5: Vergleich von mit Hilfe der Trockenwetterabflußana-
lyse gerechneten und in Quellen gemessenen Tritium-
gehalten.
- Tab. 6: Wassergesättigte Mächtigkeit der Talfüllung der Alt-
mühl - Aus Brunnenbohrungen bestimmt.
- Tab. 7: Mächtigkeit der Talfüllung der Altmühl - Aus seismi-
schen Profilen bestimmt.
- Tab. 8: Tritiumgehalte von Brunnen in der Südlichen Franken-
alb.
- Tab. 9: Oberirdische Zuflüsse in die Donau von Norden im Be-
reich Ingolstadt-Kelheim.
- Tab. 10: Oberirdische Zuflüsse in die Altmühl im Bereich
Treuchtlingen-Beilngries.
- Tab. 11: Monatliche Tritiumeintragswerte (bis 1970 von Wien,
ab 1970 vom Hohenpeissenberg) des Niederschlags.
- Tab. 12: Tritiumgehalte der Quellwässer in der Südlichen
Frankenalb.
- Tab. 13: Markierungsversuche auf der Südlichen Frankenalb.
Stand: 12.12.85. Abkürzungen: D = Doline, K = Klär-
anlage, B = Bahnlinie, S = Steinbruch, KN = kein
Nachweis, G = künstlich angelegte Grube, L = linien-
hafte Versickerung, BW = Bundeswehr, A = Amidorhoda-
min G extra, U = Uranin, E = Eosin, P = Pyranin,
n.b. = noch nicht bestimmt. Nach BEHRENS & SEILER
(1982), mündl. Mitt. Prof. SEILER und eigenen Arbei-
ten.
- Tab. 14: Sauerstoff-18-Gehalte von Quellwässern im Untersu-
chungsgebiet, gemittelt über alle Quellen.

Bohrung	Hochwert	Rechtswert	Fels u. GOK [m]	Wassersp. u. GOK [m]	gesättigte Talfüllung [m]
Walting I	541898	444875	9.5	3.2	6.3
Walting II	541918	444845	13.2	6.0	7.2
Breitenfurt	541530	443414	7.6	2.6	5.0
Kipfenberg	542364	445476	14.0	3.0	11.0
	542365	445463	15.5	3.0	12.5
	542364	445476	14.0	2.5	11.5
Landershofen	541622	444336	13.2	11.0	2.2
	541609	444326	13.7	7.2	6.5
Rieshofen	542158	444917	19.5	6.3	13.2
Eichstätt	541805	443997	16.4	1.1	15.3
	541812	443990	15.6	1.0	14.6
	541811	443994	17.0	2.3	14.7
Pfünz	541664	444531	15.6	2.4	13.2
	541659	444524	15.5	3.4	13.1
	541652	444520	15.0	2.3	12.7
	541650	444150	17.5	4.0	13.5
Beilngries	543275	446113	15.8	3.0	12.8
	543379	446203	10.9	3.0	7.9
Untereggendorf	542911	445591	7.2	1.0	6.2
	542921	445591	6.4	2.2	4.2
	542844	445778	14.9	0.8	14.1
Gungolding	542100	442375	14.4	1.6	12.8
Mittelwert			13.7		11.2

Tab. 6: Wassergesättigte Mächtigkeit der Talfüllung der Altmühl - Aus Brunnenbohrungen bestimmt.

Profil	Rechts- wert	Hoch- wert	Tiefe A [m]	Tiefe B [m]
Wasserzell W S-N	443703	541683	10.3	
Wasserzell E N-S	443719	541653	18.6	
Kipfenberg N W-E	445450	542340	13.3	
Kipfenberg S E-W	445450	542332	13.3	
Böhming S-N	445401	542338	19.1	15.3
Pfünz S-N	444615	541700	8.3	
Grösdorf Ort N-S	445593	542508	15.4	12.6
Grösdorf Ort W-E	445588	542539	11.7	12.1
Ilbling S-N	445548	542659	20.8	13.0
Attenbrunnmühle W-E	443416	541658	23.6	21.9
Gundlfing W-E	447656	542816	4.8	6.4
Unteremmendorf W-E	445905	542850	9.3	
Unteremmendorf S-N	445673	542884	9.5	23.3
Gungolding E-W	445386	542096	17.2	22.8
Oberhofen N-S	447573	542695	11.9	14.0
Mittelwert			14.5	

Tab. 7: Mächtigkeit der Talfüllung der Altmühl - Aus
seismischen Profilen bestimmt.

BRUNNEN	DATUM	T.U.	+ 2 σ
Bergheim	05.08.80	5.7	2.1
Böhmfeld	07.08.80	26.3	4.1
Breitenfurth	06.08.80	67	12
	15.12.82	60.8	5.3
Doetting	07.08.80	5.1	3.9
Dollnstein	07.08.80	78	18
	29.01.81	86.1	13.2
	27.01.82	81.3	9.6
	19.07.83	69	11
	12.09.83	64.9	5.0
	15.11.83	59.6	4.8
Eichstätt Br.V	06.08.80	64	13
Eining	06.08.80	45.5	4.5
Esslingen	02.02.81	87.1	6.3
Ingolstadt Br. IV	06.08.80	8.5	2.1
Kasing	06.08.80	12.3	3.0
Kinding	06.08.80	83	17
Kipfenberg	06.08.80	60	20
	23.06.82	53	12
	17.01.83	60	4.7
	03.05.84	30.5	2.9
	09.04.85	31.5	2.8
	09.05.85	30.0	2.7
Kohlmühle	06.08.80	13.7	3.0
Landershofen	06.07.80	80	14
	29.01.81	81.6	11.6
	27.01.82	64.9	10.3
Nassenfels	06.08.80	13.5	2.2
Oberdolling	06.08.80	2.7	2.4
Obereichstätt	06.08.80	91	11
	29.01.81	98.1	11.0
	20.09.83	65.6	4.8
	15.12.83	74.2	5.7
	14.02.84	62.5	4.7
Pappenheim I	21.11.78	96.3	7.9
	06.08.80	75	16
	29.01.81	81.7	11
Pappenheim II	21.11.78	105.0	7.7
	06.08.80	82	18

Tab. 8 : Tritiumgehalte von Brunnen in der Südlichen Frankenalb.

BRUNNEN	DATUM	T.U.	$\pm 2\sigma$
Pfünz	13.03.84	14.6	2.0
	04.04.84	14.0	2.0
	03.05.84	12.5	1.8
Pondorf	29.01.81	36.6	11.3
	13.12.82	49.8	3.9
	19.04.83	45.3	3.6
Ried	15.12.82	52.5	4.4
	22.03.83	43.7	4.2
	19.07.83	35	11
	12.09.83	37.9	4.6
Rieshofen	14.12.83	40.8	4.4
	06.08.80	83	17
	29.01.81	83.1	10.6
	27.01.82	86.5	9.4
Walting I	06.08.80	89	14
	29.01.81	86.9	10.7
Walting II	06.08.80	96	17
	29.01.81	80.3	11.3
Wellheim	06.08.80	25.5	3.2
	18.04.83	19.9	2.7
	19.07.83	36	11

Fortsetzung Tab.8 Tritiumgehalte von Brunnen in der
Südlichen Frankenalb.

Zulauf	Schüttung [l/s]
Mailinger Bach	700
Kelsbach	400
Irnsing	150
Dünzing Spielplatz	15
Dünzing Ölberg	35
Summe	1300

Tab. 9: Oberirdische Zuflüsse in die Donau von Norden im
Bereich Ingolstadt-Kelheim.

Zulauf	Schüttung [l/s]
Möhrenbach	1363
Schambach (Suffersheim)	152
Hungerbach	31
Ruckwid	100
Zimmern	5
Grafenmühle	5
Solnhofen	50
Kruspelberg	7
Gailach	700
Dollnstein	20
Attenbrunnmühle	70
Obereichstätt	817
Kapellbuck	200
Pfünz	70
Almosmühle	120
Brunnmühle	180
Isenbrunn	70
Schambach (Lohmühle)	300
Regelmannsbrunn	200
Böhming	40
Birkthal	70
Grösdorf Schloß	200
Grösdorf Ort	10
Ilbling	5
Anlauter	1399
Schwarzach	1613
Untereimmendorf Bach	15
Untereimmendorf Quelle	5
Badanhausen	40
Kirchanhausen	15
Neuzeller Brunnen	10
Sulz	1140
Summe	9021

Tab. 10: Oberirdische Zuflüsse in die Altmühl im Bereich Treuchtlingen-Beilngries.

T.U.	MONAT	T.U.	MONAT	T.U.	MONAT
20	150653	301	150654	45	150655
145	150656	120	150657	515	150658
540	150659	147	150660	92	150661
902	150662	3278	150663	1740	150664
864	150665	545	150666	297	150667
235	150668	220	150669	190	150670
171	150171	90	150271	174	150371
319	150471	389	150571	344	150671
257	150771	206	150871	164	150971
198	151071	83	151171	77	151271
117	150172	113	150272	64	150372
138	150472	156	150572	267	150672
164	150772	112	150872	116	150972
54	151072	51	151172	65	151272
101	150173	102	150273	172	150373
201	150473	147	150573	176	150673
159	150773	245	150873	131	150973
78	151073	98	151173	94	151273
54	150174	108	150274	144	150374
124	150474	220	150574	315	150674
144	150774	160	150874	78	150974
153	151074	508	151174	190	151274
175	150175	325	150275	668	150375
208	150475	272	150575	254	150675
216	150775	139	150875	222	150975
80	151075	66	151175	71	151275
175	150176	156	150276	226	150376
94	150476	233	150576	106	150676
118	150776	130	150876	69	150976
34	151076	71	151176	31	151276
46	150177	38	150277	59	150377
77	150477	151	150577	219	150677
197	150777	113	150877	133	150977
59	151077	47	151177	64	151277
96	150178	111	150278	46	150378
140	150478	109	150578	111	150678
102	150778	87	150878	60	150978
37	151078	28	151178	61	151278
43	150179	103	150279	76	150379
66	150479	82	150579	81	150679
96	150779	76	150879	73	150979
44	151079	77	151179	40	151279
27	150180	40	150280	41	150380
41	150480	63	150580	67	150680
50	150780	66	150880	36	150980
28	151080	45	151180	35	151280
36	150181	41	150281	41	150381
83	150481	72	150581	62	150681
62	150781	54	150881	36	150981
19	151081	31	151181	19	151281
21	150182	41	150282	36	150382
39	150482	39	150582	46	150682
46	150782	40	150882	27	150982
20	151082	19	151182	15	151282
22	150183	18	150283	95	150383
29	150483	31	150583	54	150683
62	150783	42	150883	38	150983
38	151083	18	151183	21	151283

Tab. 11: Monatliche Tritiumeintragungswerte (bis 1970 von Wien, ab 1970 vom Hohenpeißenberg) des Niederschlags.

Probenzeitpunkt: 30.10.79										6.-7.8.80										29.1.-12.2.81										27.1.-11.2.82										23.-30.6.83										14.-20.9.82										19-21.7.83									
QUELLE		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$		T.U. $\pm 2\sigma$																																							
Almosmühle				73	19	71.6	11.5	77.4	9.6	68	14	41	19	61	11																																																						
Altdorf				101	13			87.7	11.5	82	11	81	18	77	11																																																						
Altmühlmünster Q	22	12		31	12	26	12	39.7	12.0	24	11			23	10																																																						
Altmühlmünster S										38	12	32	10	44	10																																																						
Attenbrunnmühle				89	14	84.1	10.1	75.4	9.5	86	15	64	19	77	11																																																						
Aubrunnen	20	9				32	16	32.4	8.7	27	14	20	10	18.5	2.4																																																						
Badanhausen										74	15	69	12	69	15																																																						
Bechtal Quelle										75	15	66	10	63	11																																																						
Bechtal Fisch										76	14	56	19	59	11																																																						
Bergen										137	28																																																										
Birkthal				34	16	41	12	39.2	8.8	30	18	47	10	32.9	3.4																																																						
Böhming				63	11			56.2	10.4	56	13			46	10																																																						
Brunnhaupten														29	10																																																						
Brunnmühle				85	17	72.5	9.9	78.4	11.3	65	19	48	16	66	11																																																						
Bürg										67	14	73	19	66	11																																																						
Deising	24	9		55	10	67	14	65.9	10.3	52	13	37	10	40.9	4.1																																																						
Dollnstein				68	15	48.0	9.7	52.8	9.8	44	12	42	12	47	11																																																						
Dünzing Ölberg	47	11				32	13	46.3	12.3	33	14	25	9	32	10																																																						
Dünzing Spielpl.	74	16				51	15	54.5	9.1	31	18	41	12																																																								
Eibwang				86	14					75	14			71	13																																																						
Einsiedel												53	9	53	11																																																						
Eitensheim														92	11																																																						
Emasing				60	16	58	13			52	13	67	18	48	11																																																						
Enkering Autob.				94	12					83	12	78	11	73	11																																																						
Enkering Qu.				88	16			84.2	9.7	72	12			65	14																																																						
Erlingshofen				66	14					84	15	66	23	69	12																																																						
Erzwäsche				92	13	69	14	75.6	9.6	68	14	52	17	62	11																																																						
Etting														47	12																																																						

Tab. 12: Tritiumgehalte der Quellwässer in der Südlichen Frankenalb.

Probenzeitpunkt: 30.10.79										19-21.7.83									
6.-7.8.80										14.-20.9.82									
T.U. +2 σ										T.U. +2 σ									
T.U. +2 σ										T.U. +2 σ									
29.1.-12.2.81										27.1.-11.2.82									
T.U. +2 σ										T.U. +2 σ									
T.U. +2 σ										T.U. +2 σ									
T.U. +2 σ										T.U. +2 σ									
QUELLE										T.U. +2 σ									
Lenting Kirche										34	14			42	11			48	12
Lenting Grotte										38	12			34	15			41	13
Lenting Sammel														28	15				
Lenting Fisch										56	13			57	11			59	12
Lenting Mühle										88	14			79	11			77	12
Lenting Bahn														17	9			29	12
Lohmühle										23	12			17	13			16.8	1.6
Marching														4	11			11	
Marching Br.																		57	12
Marienquelle										85.9	9.8			76	11			67	12
Mörnsheimer Bach																		60	17
Neuzeller Br.	80	11								87.5	10.1			73	13			78	18
Niederpappenh.Q.										82	15			82	15			61	21
Niederpappenh.B.										68	14			68	14			75	16
Oberreichsstadt										85.0	10.2			78	14			67	18
Pappenheim										89.9	12.1			84	15			67	19
Pfünz																		5	16
Prunn										29.9	9.7							15.8	1.4
Regelmannsbrunn										75.3	12.5			73	14			60	12
Riedenburg										28.2	8.6			17	10			25	10
Sammühle										59	11			59	11			76	18
St. Lorenzi														26	16			17	23
Schafhausen										100.3	11.8			82	12			72.4	5.7
Schafhausen Tal														64	11			66	13
Schambach oben																		20	
Schambahaupten Qu.	24	9								20.4	8.4			7	13			27	20
Schambahaupten K.														20	10			13	9
Schutterhof																		14	15
										24	12			13	12			17	11

Fortsetzung Tab.12: Tritiumgehalte der Quellwässer in der Südlichen Frankenalb.

Eingabeort	Hoch- Rechts- werte	Austrittsort	Tracer [kg]	Eingabe- datum	Va ₂ [m/d]	Entfer- nung [m]	Rückgewin- nung [%]
Adelschlag B,D	541055-444468	KN	5 A	24.04.79			
Adelschlag K,L	541160-444430	KN	5 U	24.04.79			
Ammerfeld K,D	540675-442760	KN	5 U	29.08.84			
Amtmannsdorf K,D	542915-446613	Deising	10 E	28.06.82	3600	6650	68
Appertshofen K,D	541475-446195	KN	10 E	28.06.82			
Arnbusch K,D	542667-446613	Deising	5 E	09.04.80	941	6800	35
Aschbuch K,D	542690-446245	Deising	10 E	22.10.79	3250	10350	64
Autobahn-D 5	542075-446152	KN	5 U	06.07.83			
Autobahn-D 8	541755-446100	KN	5 U	01.09.82			
Autobahn-D 9	541395-446105	Br. Stammhamm	5 U	05.10.81	290	400	n.b.
Bettbrunn K,D	541405-446800	KN	5 P	24.04.79			
Biesenhard K,D	540997-443775	KN	10 E				
Bieswang K,D	542165-442875	Ruckwid	5 U	10.11.82			
Bitz K,D	542275-446388	KN	5 E	26.09.77	2270	3950	97
Böhmfeld K,G	541493-445400	KN	5 U	22.04.81			
Buchenhüll K,G	541957-444570	KN	5 U	09.04.80			
Denkendorf K,D	542155-445943	KN	5 U	08.10.81			
Ensfeld K,L	541212-442882	KN	5 E	10.11.82			
Erkertshofen K,D	542707-444335	Altdorf	10 E	05.07.83			
Gammersfeld K,L	540727-443073	KN	2.5E	09.04.80	5000	3950	7.1
Geländer D	542350-443540	Oberreichstätt	5 E	29.08.84			
Geländer D	542350-443540	Oberreichstätt	10 E	18.04.83	1920	6000	n.b.
Gelbelsee K,D	542370-445910	Grösdorf Schloß	2.5E	05.07.83	3600	6000	n.b.
Göhren K,L	542385-442770	Ruckwid	5 U	22.10.79	291	2950	86
Göhren K,L	542385-442770	Ruckwid	5 A	26.09.77	725	2980	n.b.
			1 U	05.10.81	n.b.	2980	n.b.

Tab. 13: Markierungsversuche auf der Städtischen Frankenalb. Stand: 12.12.85. Abkürzungen: D = Doline, K = Kläranlage, B = Bahnlinie, S = Steinbruch, KN = kein Nachweis, G = künstlich angelegte Grube, L = linienhafte Versickerung, BW = Bundeswehr, A = Amidorhodamin G extra, U = Uranin, E = Eosin, P = Pyranin, n.b. = noch nicht bestimmt. Nach BEHRENS & SEILER (1981), mündl. Mitt. Prof. SEILER und eigenen Arbeiten.

Eingabeort	Hoch- Rechts- werte	Austrittsort	Tracer [kg]	Eingabe- datum	Va2 [m/d]	Entfer- nung [m]	Rückgewin- nung [%]
Grampersdorf K,D	542645-446156	Deising	3 U 3 A	22.07.85	2250	11300	59
Hagenhill K,G	541550-447535	KN	10 E	03.09.84			
Haunsfeld K,L	541320-442930	KN	4,5 U	05.07.83			
Hennenbühl (Zell)	542600-447000	KN	10 E	10.11.82			
Hepberg (BW), D	541125-446040	KN	5 U	13.09.83			
Hirnstetten K,D	542595-444882	Schafhausen	5 E	24.04.79	379	1250	2.1
		Regelmansbrunn			1353	4900	2.2
Irfersdorf K,D	542860-446060	Qu Unterem.	10 E	19.04.83	n.b.	1900	n.b.
		Bach " (Altm.)			n.b.	950	n.b.
Kirchbuch D,D	542555-446465	Deising	5 U	19.04.83	n.b.	8550	n.b.
Krut-Biberg K,L,D	541855-445722	KN	5 U	01.09.82			
Langensallach K,D	542122-443973	Kapellbuck	5 E	05.10.81	n.b.	3150	n.b.
Oberemendorf K,D	542732-445960	Qu Unterem.	5 U	10.11.82	n.b.	1200	n.b.
		Bach " (Altm.)			n.b.	1250	n.b.
Petersbuch K,D	542700-444105	Titting	5 U	24.04.79	1905	2000	64
		Erzwäsche			39	2500	1.3
Pfahldorf K,D	542490-445080	Regelmansbrunn	5 U	22.10.79	1470	275	100
		Schafhausen			172	2500	0.04
Pondorf S,G		KN	5 U	23.05.79			
Preith K,G	542096-444225	Almosmühle	5 E	08.10.81	104	5200	n.b.
Raitenbuch K,D	543135-443635	Titting	5 E	22.04.81	1580	6350	n.b.
		Erzwäsche			1510	5400	n.b.
Rapperszell K,D	542200-444750	Isenbrunn	5 U	21.01.81	1273	2800	15
Reuth a Walde K,D	543030-443795	Titting	1 U	22.04.84	675	4500	n.b.
		Erzwäsche			667	3350	n.b.

Fortsetzung Tab.13: Markierungsversuche auf der Südlichen Frankenalb, Stand: 12.12.85.

Abkürzungen: D = Doline, K = Kläranlage, B = Bahnlinie, S = Steinbruch, KN = kein Nachweis, G = künstlich angelegte Grube, L = linienhafte Versickerung, BW = Bundeswehr, A = Amidorthodamin G extra, U = Uranin, E = Eosin, P = Pyranin, n.b. = noch nicht bestimmt. Nach BEHRENS & SEILER (1981), mündl. Mitt. Prof. SEILER und eigenen Arbeiten.

Eingabeort	Hoch- Rechts- werte	Austrittsort	Tracer [kg]	Eingabe- datum	V _{a2} [m/d]	Entfer- nung [m]	Rückgewin- nung [%]
Rupertsbuch K,G	542180-443710	Obereichstätt	10 E	25.06.80	2032	4100	4
Sappenfeld K,D	542115-443550	Obereichstätt	5 U	26.09.77	n.b.	3640	n.b.
Schellendorf K,D	541645-445600	KN	2 U	22.04.81			
			5 E				
Schöna, K,G	542030-443320	Obereichstätt	5 U	18.07.85	800	4350	4.1
Schönfeld, K,G	541850-443015	KN	10 E	18.07.85			
Seuversholz K,D	542450-444047	Brunnmühle	5 U	09.04.80	2159	9400	n.b.
		Titting			Spuren	4500	n.b.
		Walting Br. I			n.b.	9600	n.b.
Sornhüll K,D	542263-444697	Isenbrunn	5 E	09.04.80	1677	3250	93
Stammham	541455-445943	KN	10 E	13.09.83			
Steinsdorf K,G	541777-447105	KN	5 U	29.08.84			
Tettenwang K,D	541840-447880	KN	5 E	09.04.80			
Wachenzell K,D	542547-444370	Altdorf			518	4300	0.05
		Brunnmühle	5 U	12.11.79	Spuren	8000	n.b.
Welgersdorf G	542250-444122	Kapellbuck	10 E	18.07.85	1190	4575	23.8
Weilherhaus D	542453-446807	KN	5 U	14.03.80			
Wettstetten K,L	541110-445645	KN	5 E	26.07.82			
Wolfsbuch K,D	542615-446830	Deising	5 U	28.06.82	2600	4950	72
Wörmersdorf K,D	542385-444335	Brunnmühle	10 E	22.10.79	1795	6800	73
		Br.Walting I,II			n.b.	6950	n.b.
Zandt K,L,G	542110-4446395	KN	10 E	22.04.81			
Ziegelhöfe D	542530-443310	Obereichstätt	5 U	18.04.83	2653	8400	n.b.
Ziegelhöfe D	542530-443310	Obereichstätt	0.5U	05.07.83	2215	8400	n.b.

Fortsetzung Tab.13: Markierungsversuche auf der Südlichen Frankenalb. Stand: 12.12.85.
 Abkürzungen: D = Doline, K = Kläranlage, B = Bahnlinie, S = Steinbruch, KN
 = kein Nachweis, G = künstlich angelegte Grube, L = Linienhafte
 Versickerung, BW = Bundeswehr, A = Amidorhodamin G extra, U = Uranin, E =
 Eosin, P = Pyranin, n.b. = noch nicht bestimmt. Nach BEHRENS & SEILER
 (1981), mündl. Mitt. Prof. SEILER und eigenen Arbeiten.

Probennahme- datum	Mittelwert ‰ d ^{18}O	$\pm \sigma$
17.11.78	- 9.62	0.18
21.11.78	- 9.63	0.24
14.02.79	-10.43	0.38
25.02.79	-10.0	0.39
08.03.79	-10.11	0.31
08.05.79	-10.18	0.18
09.05.79	-10.01	0.17
22.05.79	-10.09	0.13
31.05.79	-10.09	0.1
16.07.79	-10.09	0.07
17.07.79	- 9.84	0.58
06.09.79	-10.0	0.51
07.09.79	- 9.98	0.17
16.10.79	- 9.91	0.11
17.10.79	-10.05	0.15
30.10.79	- 9.85	0.36
31.10.79	- 9.83	0.69
21.11.79	-10.08	0.42
22.11.79	- 9.8	0.5
09.01.80	-10.02	0.4
10.01.80	-10.05	0.28
12.02.80	-10.18	0.27
13.02.80	-10.1	0.23
25.03.80	-10.05	0.17
26.03.80	-10.02	0.1
29.01.81	- 9.98	0.17
02.02.81	- 9.88	0.19
17.09.82	-10.09	0.38
20.09.82	- 9.93	0.61

Tab. 14: Sauerstoff-18-Gehalte von Quellwässern im
Untersuchungsgebiet, gemittelt über alle Quellen.

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Großräumige Lage des Untersuchungsgebietes.
- Abb. 2: Geologisches Profil durch das Untersuchungsgebiet nach APEL (1971), Q=Quellaustritte.
- Abb. 3: Durchgangskurve eines Markierungsstoffes und die Zeiten zur Bestimmung unterschiedlich definierter Abstandsgeschwindigkeiten.
- Abb. 4: Eingabeorte und Markierungsergebnisse in Bezug zu Riff- bzw. Schichtfazies im nördlichen Donauabschnitt des Untersuchungsgebietes (vgl. auch Abb. 26).
- Abb. 5: Profilskizze:
A: Nebeneinander von Schicht- und Rifffazies.
B: Übereinander von Schicht- und Rifffazies.
- Abb. 6: Markierungsergebnisse und Bilanzierung im östlichen Teil des Anlauterabschnittes.
- Abb. 7: Skizze: Mittlere Verweilzeiten für unterschiedliche Austragskonzentrationen, berechnet nach dem piston-flow-Modell (PFM), dem Exponentialmodell (EM) und dem Dispersionsmodell (DM) für einen bestimmten Probennahmezeitpunkt.
- Abb. 8: Korrelationsdiagramm von Kalzium + Magnesium mit der elektrolytischen Leitfähigkeit für Quellwässer der Südlichen Frankenalb.
- Abb. 9: Korrelationsdiagramme Kalzium gegen Tritium und Magnesium gegen Tritium.
- Abb. 10: Skizze von parallel geschaltetem Speicherraum und Drainageraum.
- Abb. 11: Skizze: Ergebniskurven der Trockenwetterabflußanalyse einer Quelle.
- Abb. 12: Hüllkurve für Trockenwetterganglinie nach WUNDT 1953.
- Abb. 13: best-fit-Berechnung für das Trockenwetterabflußgeschehen am Pegel Prunn. $t = 0$ Tage für höchsten Schüttungswert festgelegt.

- Abb. 14: best-fit-Berechnung für das Trockenwetterabflußgeschehen am Pegel Treuchtlingen. $t = 0$ Tage für höchsten Schüttungswert festgelegt.
- Abb. 15: Volumensberechnungen aus den Ergebnissen der Trockenwetterabflußanalyse.
a: Berechnung des Drainageraumvolumens (V_d)
b: Berechnung des Hohlraumvolumens des Gesteins (V_{max}), des Speicherraumvolumens (V_s) und die einengende Drainageraumvolumensberechnung (V_{ds}).
- Abb. 16: Skizze der Berechnung von Speicherraumanteil und Drainageraumanteil am Abfluß.
- Abb. 17: Veränderlicher Integralanteil von Zufluß aus dem Speicherraum an der aufsummierten Gesamtschüttung mit fortschreitendem Trockenwettergeschehen.
1=Brunnhaupten, 2=Gläsbrunnen, 3=Prunn, 4=Schafhausen, 5=Aubrunnen, 6=Lenting, 7=Obereichstätt, 8=Treuchtlingen, 9=Berching.
- Abb. 18: Verhältnis von Drainageraumanteil am beobachtbaren Gesamthohlraumvolumen zu den mittleren Verweilzeiten des Speicherraumes in der Südlichen Frankenalb.
- Abb. 19: Skizze Dreieck-Gesteinskeil zur Porositätsberechnung.
- Abb. 20: Mit dem Exponentialmodell für Juli 1983 berechnete Tritiumgehalte für unterschiedliche mittlere Verweilzeiten und unterschiedliche Sommer/Winter-Grundwasserneubildungsverhältnisse 1:1, 1:6, 1:10.
- Abb. 21: (1) Quelle weit über der unteren Berandung des Grundwasserströmungsfeldes.
(2) Quelle direkt über der unteren Berandung des Grundwasserströmungsfeldes.
- Abb. 22: Laufskizze einer refraktierten Welle für eine geneigte Refraktionsfläche.
- Abb. 23: Skizze: kontinuierlicher, tatsächlicher Eintrag und Rechteckfunktion für Tritiumeintrag.
- Abb. 24: Überlappung der Teilstücke und zu minimierende Flächen F_1 und F_2 für die Erstellung der best-fit-Kurve.
- Abb. 25: Das Untersuchungsgebiet mit seinen Quellen und Pegeln.

- Abb. 26: Karstwassermarkierungen im Untersuchungsgebiet. mit Grenzlinie zwischen dem Bereich mit positivem Markierungsverlauf nördlich und negativem südlich davon.
- Abb. 27: Tritiumgehalte von Quellwässern im Untersuchungsgebiet.
- Abb. 28: Kalzium- und Magnesiumgehalte von Quellwässern im Untersuchungsgebiet.
- Abb. 29: Elektrolytische Leitfähigkeiten von Quellwässern im Untersuchungsgebiet.
- Abb. 30: Tektonische Karte der Südlichen Frankenalb (nach FREYBERG 1969).

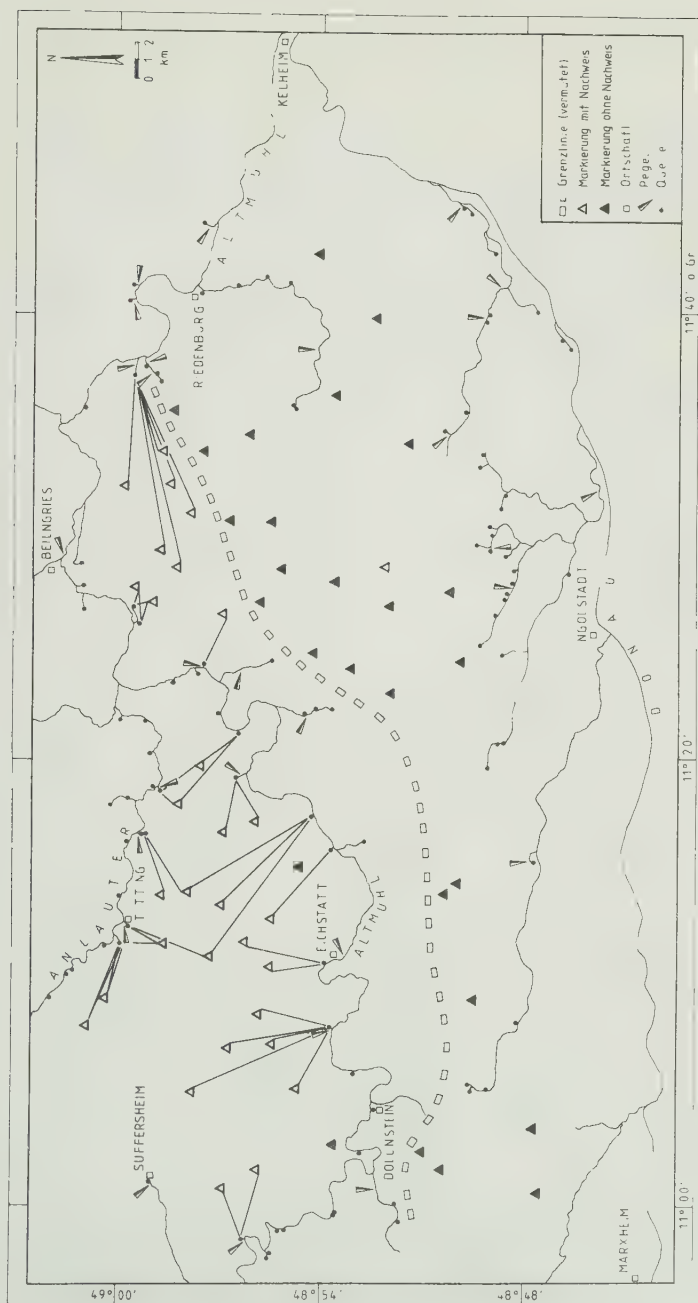


Abb. 26: Karstwassermarkierungen im Untersuchungsgebiet, mit Grenzlinie zwischen dem Bereich mit positivem Markierungsverlauf nördlich und negativem südlich davon.

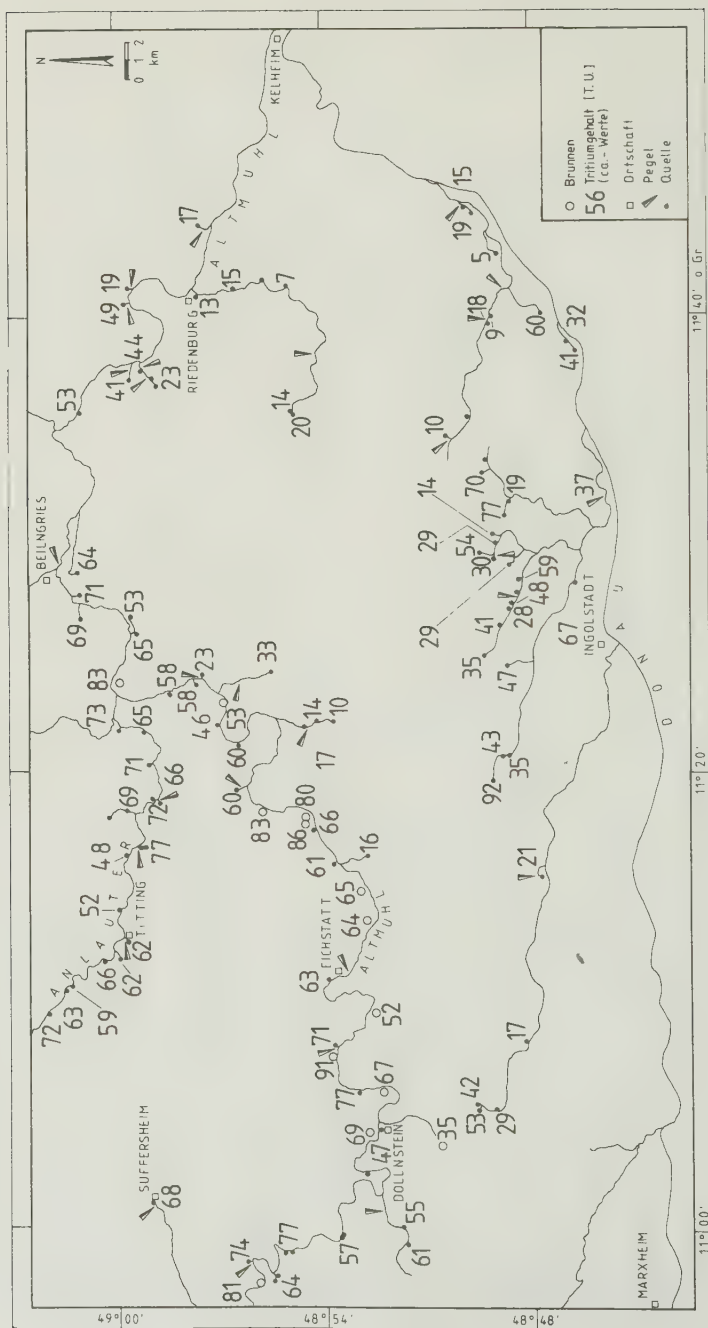


Abb. 27: Tritiumgehalte von Quellwässern im Untersuchungsgebiet.

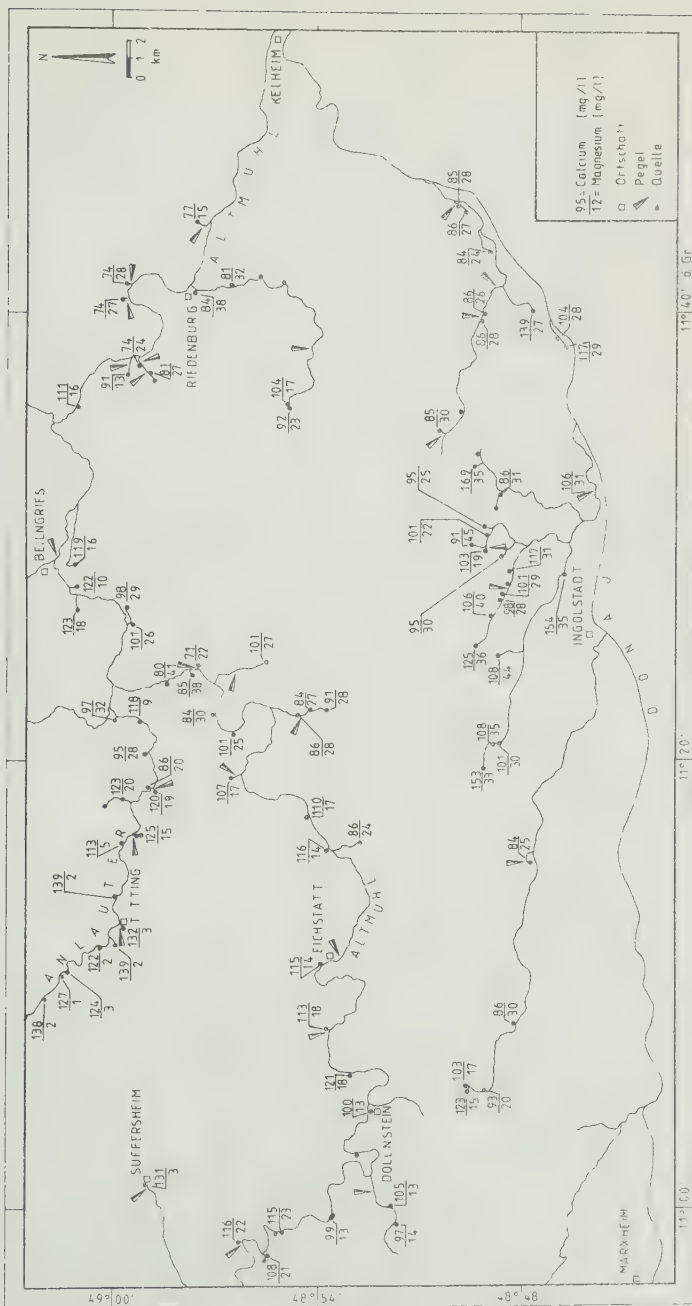


Abb. 28: Kalzium- und Magnesiumgehalte von Quellwässern im Untersuchungsgebiet.

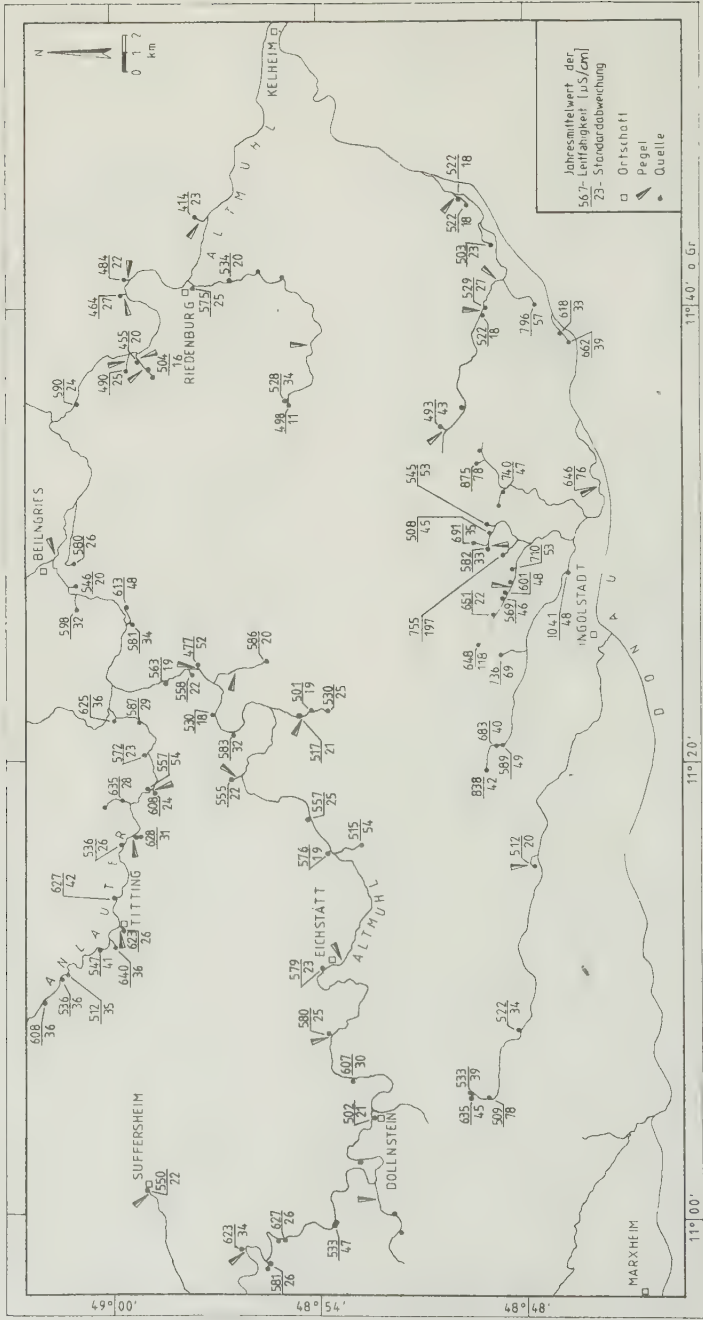


Abb. 29: Elektrolytische Leitfähigkeiten von Quellwässern im Untersuchungsgebiet.

LITERATURVERZEICHNIS

- APEL, R. (1971): Hydrogeologische Untersuchungen im Malmkarst der Südlichen und Mittleren Frankenalb. - Geol. Bav., 64: 268-355; München.
- ANDRES, G. & CLAUS, G. (1964): Das Karstwasser in der Südlichen und Mittleren Frankenalb. - Geol. Bav., 53: 194-208; München.
- ANDRES, G. & FRISCH, H. (1981): Hydrogeologie und Hydraulik im Malmkarst des Molassebeckens und der angrenzenden Fränkisch-Schwäbischen Alb. - Schriftenreihe B.L.W.W., 15: 108-117; München.
- ARBEITSANLEITUNG ZUR ANWENDUNG VON NIEDERSCHLAG - ABFLUSS - MODELLEN IN KLEINEN EINZUGSGEBIETEN (1982): Teil 1: Analyse. - DVWK-Regeln, 112: 35 S.; Hamburg.
- ARBEITSANLEITUNG ZUR ANWENDUNG VON NIEDERSCHLAG - ABFLUSS - MODELLEN IN KLEINEN EINZUGSGEBIETEN (1984): Teil 2: Synthese. - DVWK-Regeln, 113: 34 S.; Hamburg.
- ATKINSON, T. C. (1977): Diffuse Flow and Conduit Flow in Limestone Terrain in The Mendip Hills, Somerset (Great Britain). - J. Hydrol., 35: 93-110; Amsterdam.
- BATSCHKE, H., MOSER, H. & STICHLER, W. (1972): Messungen des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalts in Karstwässern. - Geol. Jb., C2: 275-288; (Hannover).
- BEHRENS, H. (1971): Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen bei ihrer Anwendung als hydrologische Markierungsstoffe. - Geol. Bav., 64: 120-131; München.
- BEHRENS, H. & SEILER, K.-P. (1981): Karstwassermarkierungen auf der südlichen Frankenalb zwischen Anlauter, Altmühl und Donau. - Geol. Bl. NO-Bayern, 31, 1: 42-54; Erlangen.
- BEHRENS, H., HÖRAUF, H., SEILER, K.-P. & WENDEL, P. (1983): Abwasserbeseitigung und Trinkwassergewinnung im Weißjurakalk in der südlichen Frankenalb. - DVGW-Schriftenreihe Wasser, 34: 277-290; Eschborn.
- BENTZ, A. (1961): Lehrbuch der angewandten Geologie. 1. Bd. Allgemeine Methoden. - 1071 S.; Stuttgart (Enke).
- BÖGLI, A. (1964): Mischungskorrosion. Ein Beitrag zum Verkarstungsproblem. - Erdkunde, 18: 83-92; Bonn.

- BÖGLI, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. - 292 S.; Berlin-Heidelberg-New York (Springer).
- BÖHMER, K. (1974): Splinesfunktionen. - 340 S.; Stuttgart (Teubner).
- BOIE, H. (1961): Wissenswertes vom Wasser und seiner Gefährdung im Karst. - Geol. Bl. NO-Bayern, 11: 40-52; Erlangen.
- BURGER, A. (1983): Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. - Gas, Wasser, Abwasser, 63/9: 533-583; München.
- BUSCH, K. & LUCKNER, L. (1974): Geohydraulik für Studium und Praxis. - 442 S.; Stuttgart (Enke).
- CIMPA, F.O. (1972): Berechnung der Evapotranspiration mit einer verbesserten Formel von Penman mit einem Anhang über die Formel von Thornthwaite. - ICID, 3/72: 9-12; Bonn.
- DAVIES, S. & DE Wiest, R. (1967): Hydrogeology. - 463 S.; New York-London-Sidney (Wiley).
- DE HAAR, U., KELLER, R., LIEBSCHER, H.J., RICHTER, W. & SCHIRMER, H. (1978): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland - 365 S.; Boppard (Boldt).
- DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH: Donaugebiet. Abflußjahre 1951-1982. - Bayer. Landesst. Gewässerk., München.
- DIN 4049 (1979): Gewässerkundliche Fachausdrücke und Begriffs-erklärungen Teil 1. - 54 S.; Berlin-Köln (Beuth).
- DOLEISCH, M. (1975): Über die Auswertung von Abflußmessungen auf elektronischen Rechenanlagen. - Wiener Mitteilungen Wasser, Abwasser, Gewässer, 9: 1-138; Wien.
- DVWK (1982): 14. DVWK-Fortbildungslehrgang Hydrologie: Hydrometrie. - 418 S.; Koblenz.
- EDLINGER, G.v. (1964): Faziesverhältnisse und Tektonik der Malmtafel nördlich Eichstätt/Mfr.. - Erl. geol. Abh., 56, 75 S.; Erlangen.
- EICHINGER, L. (1981): Bestimmung des Alters von Grundwässern mit Kohlenstoff-14: Messung und Interpretation der Grundwässer des Fränkischen Albvorlands. - Diss. Uni. München, 194 S.; München.
- ERMITTLUNG DES NUTZBAREN GRUNDWASSERDARGEBOTS (1982): DVWK - Schriften, 58: 670 S.; Hamburg.

- FRANKE, P. (1970): Abfluß aus Öffnungen. - Abriß der Hydraulik, 3: 71 S.; Wiesbaden-Berlin (Bauverlag).
- FRANKE, P. (1974): Hydraulik für Bauingenieure. - 349 S.; Berlin - New York (de Gruyter).
- FREYBERG, B.v. (1968): Übersicht über den Malm der Altmühl-Alb. - Erl. geol. Abh., 70: 40 S.; Erlangen.
- FREYBERG, B.v. (1969): Tektonische Karte der Fränkischen Alb und ihrer Umgebung. - Erl. geol. Abh., 77: 81 S.; Erlangen.
- GERTHSEN, C., KNESER, O. & VOGEL, H. (1974): Physik. - 914 S.; Berlin-Heidelberg-New York (Springer).
- GEYH, M.A. & GROSCHOFF, P. (1978): Isotopenphysikalische Studie zur Karsthydrogeologie der Schwäbischen Alb. - Abh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 8: 7-58; Freiburg.
- HÄRING, H. (1971): Karsthydrologie auf der Basis der geologisch-morphologischen Situation im Altmühl-Anlaute- und Sulz-Laber-Gebiet (Südliche Frankenalb). - Erl. geol. Abh., 83: 42 S.; Erlangen.
- KERN, H. (1954): Niederschlags-, Verdunstungs- und Abflußkarten von Bayern (Jahresmittel 1901/1951). - Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, 12 S.; München.
- KERN, H. (1975): Mittlere jährliche Verdunstungshöhen 1931-1960. - Schriftenreihe Bayer. LA f. Wasserwirtschaft, 2: 12 S.; München.
- KNEZEVIC, B. (1976): Optimation of Parameters of Discharge. Hydrograph Models Under Karst Conditions. - Proc. of Karst Hydrology and Water Resources, 259-275; Fort Collins.
- KÖPF, E. & ROTHASCHER, A. (1980): Das natürliche Grundwasserdargebot in Bayern im Vergleich zu den Hauptkomponenten des Wasserkreislaufes. - Schriftenreihe Bayer. LA f. Wasserwirtschaft, 13: 14 S.; München.
- KOVACS, J. (1983): Practical Application of Continuum Approach to Characterize The Porosity of Carbonate Rocks. - Proc. of the MIGS, 185-193; Noordwijkerhout.
- KOVALEVSKY, V.S. (1977): Prospects of Forecasting the Karstic Water Regime. - Proc. of the 12th Int. Congr. of Karst Hydrogeology, 73-80; Huntsvill.

- KULLMAN, E. (1983): Evaluation des changements des reserves en eaux souterraines dans la structure hydrogeologique du complexe calcaire dolomitique des petites carpatates (Tchecoslovaquie) en vue d'un bilan hydrogeologique. - in BURGER, A. & DUBERTRET, L.: Hydrogeology of Karstic Terrains: 46-49; Hannover (Heise).
- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. (1983): Interpretation of Artificial and Environmental Tracers in Fissured Rocks with a Porous Matrix. - Proc. of the Isotope Hydrology 1983, IAEA SM 270, 22, 635-651; Wien (IAEA).
- MATTHESS, G. (1973): Die Beschaffenheit des Grundwassers. - Lehrbuch der Hydrogeologie, 2: 324 S.; Berlin-Stuttgart (Borntraeger).
- MATTHESS, G. & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie. Grundwasserhaushalt. - Lehrbuch der Hydrogeologie, 1: 438 S.; Berlin-Stuttgart (Borntraeger).
- MILANOVIC, P. (1981): Karst Hydrogeologie. - 434 S.; Littleton. (Water Resources Publications).
- MEYER, R. (1977): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits und der Massenkalk (Malm). 3. Teil: Südliche Frankenalb. - Erl. geol. Abh., 104: 40 S.; Erlangen.
- MEYER, R. & SCHMIDT-KALER, H. (1983): Erdgeschichte sichtbar gemacht. Ein geologischer Führer durch die Altmühlalb. - 266 S.; München (Bayer. Geol. LA).
- MIJATOVIC, B. (1983): Captage par galerie dans la region de Herzegnovi (Yougoslavie). - in BURGER, A. & DUBERTRET, L.: Hydrogeology of Karstic Terrains: 126-129; Hannover (Heise).
- MOONEY, H. (1980): Handbook of Engineering Geophysics. - 172 S.; Minneapolis (Bison).
- MOSER, H. & RAUERT, W. (1980): Isothopenmethoden in der Hydrologie. - Lehrbuch der Hydrogeologie, 8: 400 S.; Berlin-Stuttgart (Borntraeger).
- MULLER, I., WACKER, C. & WITTWER, C. (1983): Detetion en continu des parametres physico-chimiques des l'eau (temperature, conductibilite, sodium) dans les sources karstiques du jura suisse. Technologie des mesures et interpretations hydrogeologiques. - Proc. of the MIGS, 279-288; Noordwijkerhout.

- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflußlinie (TWL). - Wasserwirtschaft, Sonderheft Gewässerkundliche Tagung, 12-14; Stuttgart.
- NIEDRIGWASSERANALYSE (1983): Teil 1: Statistische Untersuchung des Niedrigwasserabflusses. - DVWK-Regeln, 120: 20 S.; Hamburg.
- OMNES, G. (1977): High Accuracy Gravity Applied to The Detection of Karstic Cavities. - Proc. of the 12th Int. Congr. of Karst Hydrology, 273-284; Huntsvill.
- PALOC, H. & THIERY, D. (1983): Essai de simulation du comportement hydrodynamique d'un karst par modele deterministe. - in BURGER, A. & DUBERTRET, L.: Hydrogeology of Karstic Terrains: 80-83; Hannover (Heise).
- PENMAN, H. (1948): Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. - Proc. Royal Soc., A193: 120-145; London.
- RATS, M. & CHERNYASHOV, S. (1965): Statistical Aspect of the Problem on The Permeability of The Jointy Rocks. - Proc. of Hydrology of Fractured Rocks, 227-236; Paris.
- RICHTER, W. & LILLICH, W. (1975): Abriß der Hydrogeologie. - 281 S.; Stuttgart (Schweitzerbart).
- SALVAMOSER, J. (1982): ⁸⁵Kr im Grundwasser - Meßmethodik, Modellüberlegungen und Anwendung auf natürliche Grundwassersysteme. - Diss. Uni. München, 126 S.; München.
- SCHMIDT-KALER, H. (1979): Geologische Karte des Naturparks Altmühltal/Südliche Frankenalb 1:100 000. - Bay. Geol. LA, München.
- SCHNITZER, W. (1965): Geologie des Weißen Jura auf den Blättern Kipfenberg und Gaimersheim (Südliche Frankenalb). - Erl. geol. Abh., 57: 45 S.; Erlangen.
- SCHOELLER, H. (1965): Hydrodynamique dans le Karst. - Proc. of Hydrology of Fractured Rocks, 3-20; Paris.
- SCHRÖDTER, H. (1985): Verdunstung: Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden. - 186 S.; Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo (Springer).

- SEILER, K.-P. (1968): Grundwasserfließvorgänge im klüftigen und porösen Medium des mittleren Buntsandsteins im Saarland. - Diss. Uni. Tübingen, 124 S.; Tübingen.
- SEILER, K.-P. (1977): Hydrogeologie glazial übertiefer Täler der Bayerischen Alpen zwischen Lech und Wössner Tal. - Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 29: 5-118; Graz.
- SEILER, K.-P. (1980): Geological and Hydraulic Boundary Conditions for The Interpretation of Isotope Data. - Proc. of the Interamerican Symposium on Isotope Hydrology, 43-59; Bogota.
- SIMPSON, E. (1976): Finite State Mixing Cell-Models. - Hydrology and Water Resources, 489-512; Tucson.
- STICHLER, W. & HERMANN, A. (1982): Surface and Subsurface Runoff Modeling Using Environmental Isotopes. - Proc. of the Rainfall - Runoff Relationships, 245-260; Mississippi.
- STOER, J. (1983): Einführung in die numerische Mathematik I. - 297 S.; Berlin-Heidelberg-New York (Springer).
- STOER, J. & BURLISCH, R. (1978): Einführung in die numerische Mathematik II. - 308 S.; Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo (Springer).
- STRAYLE, G. (1970): Karsthydrologische Untersuchungen auf der Ebinger Alb (Schwäbischer Jura). - Jh. Geol. LA Baden-Württemberg, 12: 109-206; Freiburg.
- STREIT, R. (1963): Faziesverhältnisse und Lagerung des Weißen Jura auf Blatt Burgheim Nord (Südliche Frankenalb). - Erl. geol. Abh., 51: 30 S.; Erlangen.
- STREIT, R. (1971): Karstwasservorräte in der Fränkischen Alb. - Geol. Bav., 64: 254-267; München.
- TORBAROV, K. (1976): Estimation of Permeability and Effective Porosity in Karst on The Basis of Recession Curve Analysis. - Proc. of the Karst Hydrology and Water Resources, 121-136; Fort Collins.
- VILLINGER, E. (1969): Karsthydrologische Untersuchungen auf der Reutlinger Alb (Schwäbischer Jura). - Jh. Geol. LA Baden-Württemberg, 11: 201-277; Freiburg.
- VILLINGER, E. (1972): Seichter Karst und Tiefer Karst in der Schwäbischen Alb. - Geol. Jb., C2: 153-188; Hannover.

- VILLINGER, E. (1977): Über Potentialverteilungen und Strömungssysteme im Karstwasser der Schwäbischen Alb (Oberer Jura, SW-Deutschland). - Geol. Jb., C18: 3-93; Hannover.
- VILLINGER, E. (1983): Grundwasservorkommen und Wasserschutzgebiete im Karst von Baden-Württemberg. - DVWG-Schriftenreihe Wasser, 34: 119-161; Eschborn.
- WARD, R. (1971): Measuring Evapotranspiration, a Review. - J. Hydrol., 13: 1-21; Amsterdam.
- WEIDENBACH, F. (1954): Über einige Wasserbohrungen im Jura. - Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., 36: 54-73; Stuttgart.
- WILDENBERGER, A. (1981): Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawil-Gebiet. - Beiträge zur Geologie der Schweiz, 27: 175 S.; Bern.
- WUNDT, W. (1953): Gewässerkunde. - 320 S.; Berlin - Göttingen - Heidelberg (Springer).
- ZEISS, A. (1964): Geologie des Malm auf Gradabteilungsblatt Dollnstein (Südliche Frankenalb). - Erl. Geol. Abh., 55: 43 S.; Erlangen.
- ZÖTL, J. (1974): Karsthydrogeologie. - 291 S.; Wien-New York (Springer).

Lebenslauf

Name	Thomas Pfaff
Anschrift	8000 München 81 Rudliebstr. 11
Geboren am	11.01.1956
Familienstand	ledig

Juni 1975 Abitur München (Wittelsbacher Gymnasium)

Mai 1976 Beginn des Studiums der Geologie an der
Ludwig-Maximilians-Universität München am
Institut für Allgemeine und Angewandte
Geologie

Juli 1982 Diplom an der Ludwig-Maximilians-Universität
München am Institut für Allgemeine und Ange-
wandte Geologie

November 1983 Anstellungsverhältnis als Wissenschaftlicher
Mitarbeiter bei der Gesellschaft für Strah-
len- und Umweltforschung, Neuherberg

Meine akademischen Lehrer waren die Herren Prof. Dr.:

Angenheister, Bodechtel, Fahlbusch, Grimm, Hagn, Herm, Höll,
Huckenholz, Jagodzinski, Masch, Moser, Klemm, Propach,
Schmidt, Seiler, Troll und Weber-Diefenbach.

